

## ПЛАНИРОВАНИЕ ПОПУСКОВ В НИЖНИЙ БЬЕФ НОВОСИБИРСКОГО ГИДРОУЗЛА В УСЛОВИЯХ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ СИТУАЦИЙ

А.А. Атавин, А.Т. Зиновьев, А.В. Кудишин

*Численная модель гидроледотермического режима реки в нижнем бьефе Новосибирского гидроузла используется для изучения влияния подпора (из-за наличия льда) на уровень свободной поверхности в районе основного водозабора г. Новосибирска.*

### ВВЕДЕНИЕ

Строительство Новосибирского гидроузла на Верхней Оби привело к существенным изменениям гидрологического, руслового и ледотермического режимов реки на участке нижнего бьефа. Длительная разработка русловых карьеров нерудных строительных материалов в нижнем бьефе гидроузла привела к понижению уровней свободной поверхности водного потока, что особенно заметно сказывается в летне-осенний и зимний маловодный периоды. Из-за посадки свободной поверхности в нижнем бьефе режим эксплуатации Новосибирского водохранилища определяется в настоящее время необходимостью поддержания уровней в черте города Новосибирска на отметках, обеспечивающих надежную работу ключевых систем коммунального и промышленно-энергетического водоснабжения в меженные периоды, особенно в годы с особо низким притоком воды в эти периоды.

С этих позиций дефицитным периодом по величине стока является осенне-зимний период года. Для получения количественных оценок минимально необходимых попусков в нижний бьеф Новосибирского гидроузла в зимние месяцы эксплуатации водохранилища используется комплексная гидроледотермическая модель нижнего бьефа (1ДН-модель) [1, 2]. Показано, что результаты численного моделирования динамики ледяного покрова в нижнем бьефе Новосибирской ГЭС могут служить основой для обоснования режимов попусков, позволяющих обеспечить устойчивое функционирование речных водозаборов в районе г. Новосибирска.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Количественные оценки изменений термического и ледового режима на зарегулированных участках рек достаточно надежно могут быть получены на основе математического моделирования гидродинамических и термодинамических процессов в водоемах и водотоках [1-4]. В настоящей работе для этих целей используется комплекс математических моделей, описывающих гидроледотермический режим зарегулированного участка реки [1,2]. Базовой моделью данного комплекса является модель гидравлического режима нестационарного руслового потока. К остальным моделям относятся модель температурного режима реки, модель образования и переноса шугового материала, модель движения кромки льда, модель роста-таяния ледяного покрова. Математическая постановка задачи описания нестационарных гидроледотермических процессов на зарегулированном участке реки в нижнем бьефе гидроузла дана в работах [1,2].

Разобьем область определения  $\Omega \in \{(x,t): 0 \leq x \leq L, 0 \leq t \leq t_k\}$  ( $0, L$  – координаты створа плотины и некоторого замыкающего створа соответственно;  $t_k$  – расчетный период времени) на подобласти  $\Omega_1, \Omega_2$  и  $\Omega_3$ :  $\Omega = \Omega_1 \cup \Omega_2 \cup \Omega_3$  с учетом специфики определяющих физических процессов следующим образом (см. рис. 1):

1. на пространственно-временной подобласти  $\Omega_1$  рассматривается нестационарное течение в открытом русле в отсутствие ледовых процессов;
2. подобласти  $\Omega_2$  отвечает участок реки, где протекают процессы шугообразования;
3. участку реки под ледяным покровом соответствует подобласть  $\Omega_3$ .

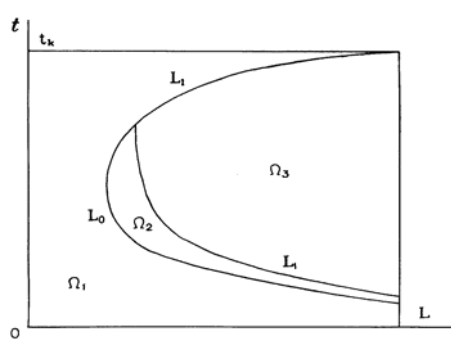


Рис. 1. Область определения  $\Omega$

Отметим, что представленное на рис. 1 разбиение области определения  $\Omega$  отвечает упрощенной ситуации движения кромки льда – однократному ее наступлению-отступлению. Линия  $L_0=L_0(t)$  отмечает положение створа нулевой изотермы при наступлении кромки льда (“заныривание” нулевой изотермы под лед на рис. 1 не отображено). Положение створа нулевой изотермы  $L_0$  для любого  $t \in (0, t_k)$  определяется из следующих условий:

$$T(L_0) = 0 \text{ и } T(x) > 0 \text{ при } x < L_0.$$

Кривой  $L_i = L_i(t)$  на рис. 1 представлено положение кромки льда. В терминах  $L_0, L_i$  и  $L$  участка реки, где протекают процессы шугообразования, соответствует область  $\Omega_2 = \{(x, t): L_0 \leq x \leq L_i, 0 \leq t \leq t_k\}$  (если кромка ледяного покрова находится вне границ области  $\Omega$ , то полагаем  $L_i = L$ ); область сплошного ледяного покрова может быть определена как  $\Omega_3 = \{(x, t): L_i \leq x \leq L, 0 \leq t \leq t_k\}$ .

В данной схематизации ледотермических процессов в нижнем бьефе делается предположение о сплошности ледяного покрова, т.е. не рассматриваются случаи возникновения полыньи правее границы  $L_i$  на рис. 1.

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Для Новосибирского гидроузла в период зимнего минимума весьма актуальна проблема определения минимальных объемов попусков в нижний бьеф, достаточных для нормальной работы городских водозаборов. С точки зрения оптимизации режима попусков из водохранилища необходимо исследовать влияния подпора из-за наличия льда на уровень свободной поверхности реки в районе основного водозабора г. Новосибирска (НФС-5), расположенного на расстоянии 15,6 км от Новосибирской ГЭС. Очевидно, что зимой при некотором заданном расходе воды уровень свободной поверхности реки в районе водозабора НФС-5 из-за влияния подпора

будет существенно зависеть от длины полыньи.

Для получения количественных оценок влияния подпора на уровень водной поверхности в районе водозабора построена численная модель гидродотермического режима зарегулированного участка р. Обь в нижнем бьефе Новосибирского гидроузла. Для этой цели использованы морфометрические данные для русла реки Обь в 1988 г. и значения коэффициента шероховатости русла на рассматриваемом участке реки, которые задавались по результатам работы [5]. Для решения поставленной задачи с использованием математической модели [1,2] выполнены варианты расчетов гидродотермического режима реки в нижнем бьефе (НБ) Новосибирского гидроузла. Для апробации гидродинамического блока комплексной модели были рассчитаны характеристики речного потока в НБ Новосибирской ГЭС при отсутствии ледовых явлений. При расчетах рассредоточенный сток и притоки для данного участка р. Обь не учитывались в силу их малости.

На рис. 2 сплошной кривой 1 показан профиль свободной поверхности воды на 50-километровом участке реки, начиная от створа плотины, рассчитанный при постоянном расходе воды  $1300 \text{ м}^3/\text{с}$  и для значений коэффициента шероховатости, определенных по типу дна. Здесь же пунктирная кривая 2 иллюстрирует измеренные значения уровня свободной поверхности (данные наблюдений на 50-километровом приплотинном участке НБ). Нижняя сплошная кривая с нанесенными на ней квадратами на рис. 2 показывает отметки уровня дна по линии наибольших глубин. Близость кривых 1 и 2 на 50-километровом приплотинном участке позволяет сделать вывод, что представленная математическая модель правильно описывает течение реки в нижнем бьефе ГЭС.

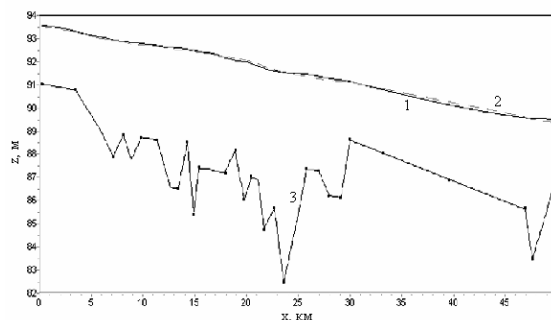


Рис. 2. Профиль уровня свободной поверхности при постоянном расходе  $1300 \text{ м}^3/\text{с}$

## ПЛАНИРОВАНИЕ ПОПУСКОВ В НИЖНИЙ БЬЕФ НОВОСИБИРСКОГО ГИДРОУЗЛА В УСЛОВИЯХ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ СИТУАЦИЙ

В целом, при верификации модели и проведении вариантных расчетов были использованы следующие материалы из подготовленной в ИВЭП СО РАН базы данных:

- метеоданные, полученные по результатам наблюдений на агрометеостанции «Огурцово» ГУ НГЦ и МОС;
- морфометрические данные, полученные на основе материалов водных изысканий в маловодном 1988 году;
- данные по температуре и расходам сбрасываемой из водохранилища воды;
- данные по уровню свободной поверхности при постоянном расходе воды;
- данные о температуре воды в р. Обь по наблюдениям на водном посту «г. Новосибирск»;
- информация о шуго-ледяных явлениях, наблюденных на р. Обь на водном посту «г. Новосибирск».

С точки зрения влияния подпора (из-за наличия льда) на уровень свободной поверхности реки в районе водозабора НФС-5 предельные ситуации по положению уровня свободной поверхности определяются минимальными и максимальными размерами полыньи. В случае минимальной длины полыньи реки при некотором заданном расходе воды уровень свободной поверхности в районе водозаборов из-за подпора будет максимальным; при больших размерах полыньи влияние подпора отсутствует.

Для анализа влияния ледового покрова на положения уровня свободной поверхности в зимние периоды в различных метеоусловиях выполнена серия вариантных расчетов. При расчетах были использованы данные Ленгидропроекта о пределах изменения длины полыньи в нижнем бьефе Новосибирской ГЭС в разные зимние месяцы, приведенные в таблице 1.

Таблица 1

мес.	Дек.	январь	фев.	март	апр.
км	150-15	20-3	30-3	80-20	150-30

При проведении вариантных расчетов задавались фиксированные расходы воды 400, 600 и 900 м<sup>3</sup>/с; предельные положения кромки ледяного покрова соответствовали табличным данным в зависимости от месяца

При решении гидравлической задачи на участке с ледяным покровом использовался приведенный коэффициент шероховатости  $n_0$ , определенный по формуле Сабанеева  $n_0 = ((n_p^{3/2} + n_i^{3/2})/2)^{2/3}$ , где  $n_p$  и  $n_i$  – коэффициенты шероховатости русла и нижней по-

верхности льда, соответственно.

Результаты расчетов показали, что размеры участка влияния подпора из-за кромки льда составляют 20-30 км. Подъем уровня воды в районе водозабора НФС-5 в результате подпора может составить 0,5-1,0 м, если кромка льда будет находиться на расстоянии не более 30 км от плотины.

Длина полыньи существенно зависит как от степени суровости зимы (совокупности метеофакторов), так и от теплового стока из водохранилища. Тепловой сток зависит от температуры и расходов сбрасываемой из водохранилища воды. Температура воды в водохранилище заметно меняется в течение зимы, несколько увеличиваясь с установлением ледяного покрова и уменьшаясь во второй половине зимы [6]. Температура сбрасываемой воды незначительно отличается от температуры воды в водохранилище. Комплексная гидроледотермическая модель нижнего бьефа Новосибирской ГЭС позволяет детально изучить влияние метеофакторов и теплового стока на длину полыньи и, соответственно, на уровень водной поверхности в створе водозабора НФС-5.

Некоторые сценарии ледовых ситуаций в нижнем бьефе Новосибирской ГЭС демонстрируют рис. 3 и 4, на которых представлена динамика размеров полыньи в различные зимние периоды. На рис. 3 приведены размеры полыньи, рассчитанные с использованием метеоданных для 1981/1982 гг. («теплая» зима); на рис. 4 – с использованием метеоданных для 1965/1966 гг. («холодная» зима). В обоих расчетах расход воды принимался постоянным и равным 600 м<sup>3</sup>/с, температуры сбрасываемой из водохранилища воды также считалась постоянной и равной 2 °С. В естественных условиях эксплуатации гидроузла, вероятно, наблюдаются более низкие величины теплового стока. Поэтому размеры полыньи в зимние месяцы могут быть несколько завышенными.

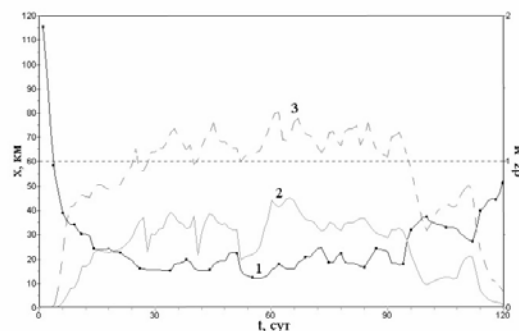


Рис. 3. Длина полыньи в нижнем бьефе Новосибирской ГЭС в 1981/1982 гг.

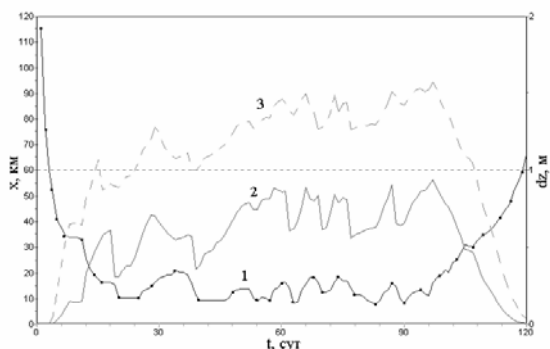


Рис. 4. Длина полыни в нижнем бьефе Новосибирской ГЭС в 1965/1966 гг.

Кривыми 2 на рис. 2,3 показано увеличение уровня водной поверхности  $\Delta z$  в створе водозабора НФС-5 из-за подпора при коэффициенте шероховатости нижней поверхности ледяного покрова  $n_i=0,015$ . Здесь же пунктирными кривыми 3 представлено увеличение уровня при  $n_i=0,030$ . Из анализа рис. 3 и 4 следует, что в течение почти всего зимнего периода нужно ожидать существенного влияния подпора от ледяного покрова на уровень свободной поверхности в районе водозаборов.

При выполнении вариантных расчетов длины полыни учитывалось, что выбор начального положения кромки льда  $L_i|_{t=0}$  мало сказывается на последующей динамике кромки ледяного покрова [1,2].

Результаты выполненных расчетов соответствуют наблюдаемой ледовой картине в нижнем бьефе Новосибирской ГЭС, где средняя протяженность полыни колеблется в пределах от 6 до 30 км в течение зимы, а средняя дата образования полыни в нижнем бьефе Новосибирской ГЭС приходится на 13 декабря, средняя дата начала весеннего ледохода – 30 марта [6].

Для отработки методики учета влияния подпора на уровень свободной поверхности в створе НФС-5 были выполнены расчеты квазистационарных режимов в нижнем бьефе Новосибирского гидроузла. В первом варианте расчетов таких гидравлических режимов р. Обь на участке нижнего бьефа были использованы следующие краевые условия: во входном створе при  $x=0$  (створ ГЭС)  $Q=Q(t)=const$ ; в выходном створе ( $x=21,9$  км, гидрост «Новосибирск») кривая связи  $Q=Q(z)=1050*(z-90,98)$ .

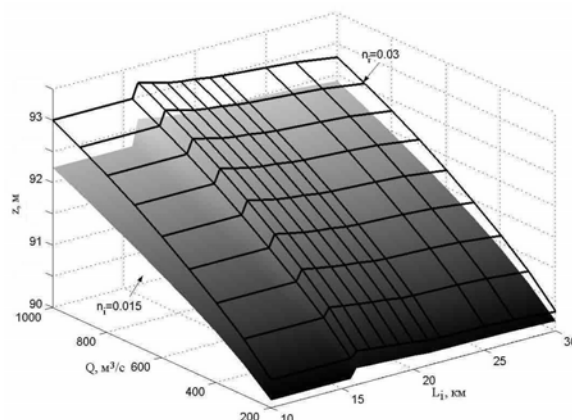


Рис. 5. Поверхность  $z(Q, L_i)$  для створа  $x=15,6$  км

В расчетах учитывалось, что гидрологические характеристики речного потока в подбласти  $\Omega_3$  (в присутствии льда) меняются из-за увеличения смоченного периметра и дополнительного учета шероховатости ледяного покрова. При этом коэффициент шероховатости нижней поверхности льда  $n_i$  в вариантных расчетах также принимался равным 0,030 и 0,015, что примерно соответствует изменениям среднего коэффициента шероховатости в течение зимы [7] и дает оценки сверху и снизу влияния подпора на уровень водной поверхности.

В результате выполненных расчетов были определены значения уровня свободной поверхности  $z$  в створе  $x=15,6$  км (водозабор НФС-5) при различных положениях кромки льда  $L_i$  ( $L_i=10, 15,6, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 21,9$  км) для набора постоянных значений расхода воды  $Q$  на входе (от 200 до 1000 м<sup>3</sup>/сек с шагом 100 м<sup>3</sup>/сек). В итоге были получены для двух значений коэффициента шероховатости  $n_i$  два набора "точек" на поверхности  $z(Q, L_i)$ , по которым построены эти поверхности (см. рис. 5). В плоскости  $(Q, L_i)$  построены две изолинии  $z = 91,76$  м, соответствующие минимально допустимому уровню водной поверхности на водозаборе при разных значениях коэффициентов шероховатости  $n_i$  (см. рис. 6).

Монотонный характер изменения функции  $Q=f(L_i)$  на изолиниях нарушается при достижении кромкой льда створа водозабора НФС-5 и связан с конечной толщиной ледяного покрова. Фактически, в плоскости  $(Q, L_i)$  изолинии ограничивают область расходов  $Q$ , которые оптимизируют величину попусков из водохранилища в зависимости от прогноза положения кромки ледяного покрова  $L_i$ . Следует отметить, что в этой серии расчетов проектный уровень  $z=93,56$  м свободной по-

## ПЛАНИРОВАНИЕ ПОПУСКОВ В НИЖНИЙ БЬЕФ НОВОСИБИРСКОГО ГИДРОУЗЛА В УСЛОВИЯХ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ СИТУАЦИЙ

верхности в створе водозабора НФС-5 для рассмотренных значений расходов воды при современной морфометрии русла в нижнем бьефе Новосибирской ГЭС не был достигнут.

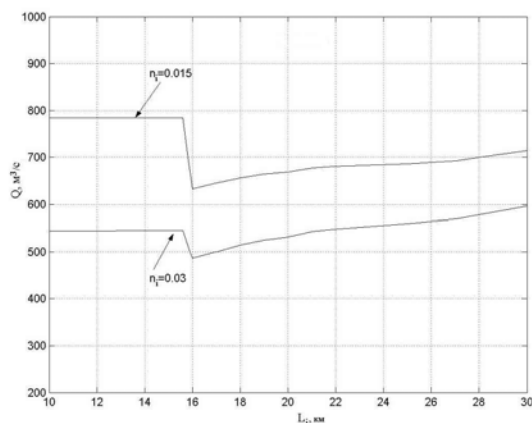


Рис. 6. Изолинии  $z=91,76$  м на поверхности  $z(Q, L_i)$  для створа НФС-5. Коэффициенты шероховатости нижней поверхности льда  $n_i=0,015$ ;  $0,030$

Во втором варианте расчетов квазистационарных гидравлических режимов р. Обь на участке нижнего бьефа были использованы другие краевые условия: во входном створе при  $x=0$  (створ ГЭС)  $Q=Q(t)=const$ ; в выходном створе – условия свободного протекания.

Аналогично первому варианту расчетов по набору "точек" на поверхности  $z(Q, L_i)$  построена эта поверхность. В случае расчетов квазистационарных гидравлических режимов можно в первом приближении считать, что створ нулевой изотермы совпадает со створом кромки ледяного покрова. Пусть  $Q$  – расход, при котором для заданных значений метеопараметров и тепловом стоке обеспечивается выполнение условия  $\Delta z \geq 0$  ( $\Delta z = z - z^*$ ).

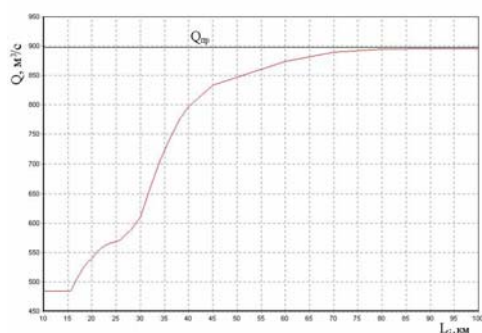


Рис. 7. Изолиния  $z=93,56$  м на поверхности  $z(Q, L_i)$  для створа НФС-5. Коэффициент шероховатости нижней поверхности льда  $n_i=0,030$ .

В отсутствие льда существует некоторый минимальный расход  $Q_{мин}$ , при котором в створе  $x=15,6$  км выполняется условие  $\Delta z=0$ , т.е. обеспечивается минимальный уровень

водной поверхности  $z^*$ , при котором гарантирована надежная работа городского водозабора НФС-5. По проекту  $Q_{мин}$  равен  $890 \text{ м}^3/\text{с}$ .

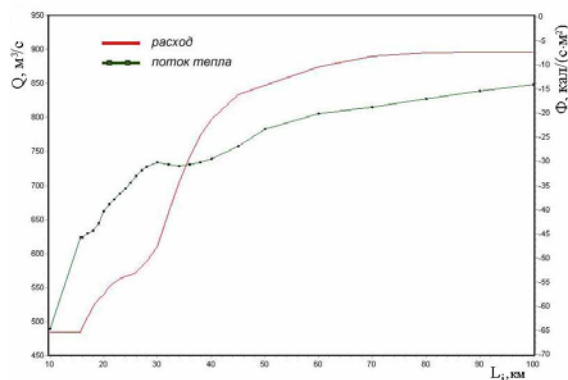


Рис. 8. Удельная плотность теплового потока

На рис. 7 приведена изолиния  $z=93,56$  м, которая позволяет определить минимально необходимый расход сбрасываемой в нижний бьеф воды при различных положениях кромки ледяного покрова  $L_i$ . При удалении кромки ледяного покрова от створа плотины кривая критических расходов  $Q_{мин}$  асимптотически приближается к горизонтальной линии, отвечающей проектному значению  $Q_{пр}=890 \text{ м}^3/\text{с}$ .

На рис. 8 приведены значения удельного теплового потока (характеризующие положение створа нулевой изотермы), определяющие положения кромки льда. Совокупность кривых на рис. 8 позволяет предложить методику оптимизации попусков из водохранилища, основанную на прогнозе положения кромки ледяного покрова  $L_i$

Суть данной методики в следующем:

- на первом этапе по краткосрочному прогнозу метеобстановки в районе нижнего бьефа выполняется расчет положения кромки ледяного покрова (или прогноз удельного теплового потока);

- на втором этапе по положению кромки льда (или по значениям удельного теплового потока) определяется минимальный расход сбрасываемой воды, обеспечивающий уровень  $z^*$  в створе водозабора НФС-5.

В целом, расчеты подтвердили, что при управлении уровнем водной поверхности в районе водозаборов посредством изменения расходов сбрасываемой из водохранилища воды следует учитывать прогнозы положения кромки льда, зависящего от метеоусловий в районе нижнего бьефа гидроузла. Для подготовки практических рекомендаций требуется дополнительно исследовать вопросы, связанные с заданием граничных условий для

расчета подледного водного потока и назначением коэффициентов шероховатости нижней поверхности ледяного покрова.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение отметим, что комплексная гидроледотермическая модель нижнего бьефа (1DH-модель) может использоваться как для изучения условий эксплуатации действующих гидроузлов, так и для решения ряда вопросов управления при эксплуатации гидросооружений [4]. Данная модель при необходимости может быть дополнена более детальным описанием гидро- и термодинамических процессов, к примеру, учетом видовой разнообразия льда (внутриводный лед, поверхностная шуга и т.д.) и включением блоков, описывающим зажорно-заторные явления в нижних бьефах. Данные усовершенствования могут потребоваться при решении задач, возникающих при изучении условий эксплуатации ГЭС и гидроузлов в зимний период года в условиях суточного регулирования стока.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ для поддержки ведущих научных школ РФ № НШ-22.2003.5, Программы № 13 фундаментальных исследований Президиума РАН "Изменение окружающей среды и климата: природные катастрофы" (проект СО РАН № 9, Фонда содействию малых форм предпри-*

*ятий в научно-технической сфере (проект № 5752) и гранта РФФИ № 03-05-65399а.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Atavin A.A., Kudishin A.V., Zinoviev A.T. Mathematical modeling of hydrotechnical construction impact on hydrothermal and ice cover behavior of river // *Advances in Hydro-Science and Engineering*. Washington. Part A, edited by Sam S.Y. Wang. 1993. –V. 1. – P. 1019-1024.
2. Атавин А.А., Зиновьев А.Т., Кудишин А.В. Математическое моделирование гидротермического режима зарегулированного участка реки // *Материалы Международной научной конференции «Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов на рубеже третьего тысячелетия»*. – Томск: Изд-во ТФ ИГНГ СО РАН, 2000. – С. 371-375.
3. Белолипецкий В.М., Туговиков В.Б. Математическое моделирование динамики ледового покрова в нижнем бьефе Красноярской ГЭС // *Метеорология и гидрология*. – 1990. – № 9. – С.94-99.
4. Атавин А.А., Зиновьев А.Т., Кудишин А.В. Гидроледотермический режим в бьефах Крапивинского гидроузла. Прогноз и вопросы управления // *Ползуновский вестник*. – 2004. – № 2. – С.39-44.
5. Семчуков А.Н., Атавин А.А., Квон В.И., Дегтярев В.В., Алексеева Н.В. Оценка условий работы речных водозаборов в нижних бьефах ГЭС при суточном регулировании стока // *Известия вузов. Строительство*. – 2003. – Т.2. – С.73-82.
6. Савкин В.М. Эколого-географические изменения в бассейнах рек Западной Сибири. - Новосибирск: Наука, 2000. – 152 с.
7. Готлиб Я.Л., Донченко Р.В., Пехович А.И., Соколов И.Н. Лед в водохранилищах и нижних бьефах ГЭС. – Л.: Гидрометеиздат, 1983. – 200 с.