

# МОДЕЛИРОВАНИЕ СТОКА ВОДЫ РЕКИ ДНЕПР С УЧЕТОМ КАСКАДА ВОДОХРАНИЛИЩ

*К.Е. Краевский, А.В. Прусов*

Морской гидрофизический институт  
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2  
*E-mail:* oaoimhi@inbox.ru

*В статье приводятся результаты расчетов по гидрологической модели HYPE, адаптированной к бассейну реки Днепр. Рассматриваются способы параметризации стока из водохранилищ в модели. Предложены новые методики моделирования сработки водохранилищ с различными режимами работы.*

**Введение.** В настоящее время прогноз стока при помощи математических моделей является актуальной задачей. Знание прогноза расходов рек необходимо во многих отраслях человеческой деятельности. Также прогнозирование

расходов рек является начальным этапом для моделирования такого явления как паводок. При адаптировании различных математических моделей могут возникнуть проблемы связанные с особенностями исследуемого региона. В данной статье приводится пример одной из проблем возникающей при адаптации модели – моделирование зарегулированных водохранилищ.

**Описание модели.** Для моделирования расхода воды реки Днепр использовалась гидрологическая модель HYPE (Hydrological Predictions for the Environment). Модель HYPE – это динамическая, интегрированная модель водосбора. В ней используются хорошо известные методы моделирования переноса водных масс и питательных веществ через бассейны разных размеров [1]. При применении модели HYPE изучаемая область разделяется на суббассейны. Пример разбиения на суббассейны приведен на рис. 1.

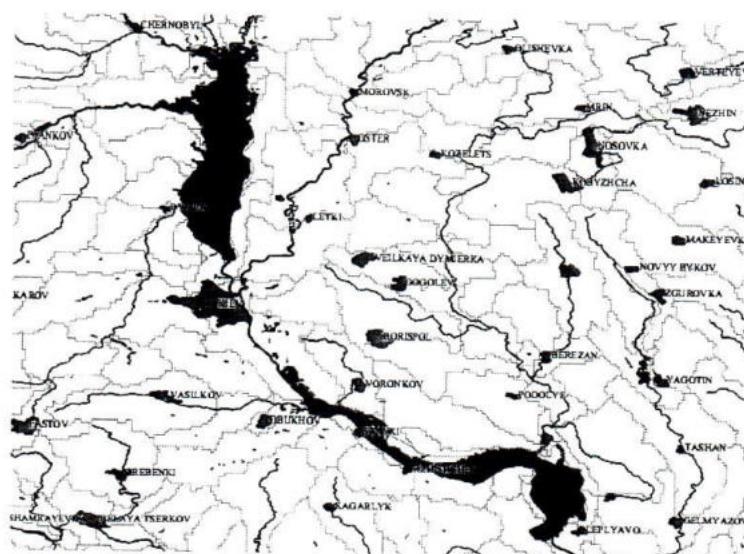


Рис. 1. Разделение на суббассейны. Выделены: сверху – Киевское водохранилище, снизу – Каневское водохранилище [2]

Суббассейны могут быть либо независимыми, либо соединяются реками и региональными потоками подземных вод. Каждый суббассейн в свою очередь может быть подразделен на классы, которые являются наименьшими пространственными элементами модели.

Классы не связаны с географическими местами расположения, а определяются как доли площади суббасейна.

Классы являются элементами площади поверхности со схожими свойствами (такими как растительный покров, землепользование, высота над уровнем моря и т.д.).

**Входные параметры модели.** В качестве входных параметров, модели использовались климатические данные (среднесуточные осадки и температуры), географические данные (площади субба-

сейнов, данные типов почв, данные о землепользовании, наклон и высота над уровнем моря), параметры озер (глубина, данные о зарегулировании и оценочные кривые), данные качества воды (содержание питательных веществ в почве) и данные по землепользованию (используемые удобрения, время посева и сбора урожая).

#### Валидация модельных данных.

Для валидации расчетных данных модели HYPE за период 2002 – 2006 гг. использовались данные наблюдений сработки водохранилищ, а также данные стока реки Днепр в районе г. Каховка.

**Результаты и обсуждения.** Используя модель HYPE, был произведен рас-

чет величины стока воды реки Днепр за период 2002 – 2006 гг. Данный этап моделирования проходил без параметризации каскада водохранилищ. Каждое из водохранилищ было установлено в модели как незарегулированные проточные озера. Результат моделирования не соответствовал данным наблюдений. Из этого следовало, что необходима параметризация каждого из водохранилищ, для получения приемлемых значений расхода реки в районе устья. Регулируемые параметры, используемые для параметризации водохранилищ, приведены на рис. 2.



Рис. 2. Схема стандартного водохранилища, используемая в модели

Отток из водохранилища зависит от разницы уровней воды между пороговой глубиной и минимальным значением уровня. Продуцируемый поток может зависеть от времени года и уровня. Минимальный уровень регулируется параметром в модели и величиной площади поверхности водохранилища. Изменение площади водного зеркала с глубиной в модели не учитывается, что является ее существенным недостатком и требует дальнейшей доработки. Для уровней воды ниже пороговой величины, отток рассчитывается с помощью специальной оценочной кривой или регулируется при помощи коэффициента, задаваемого в модели.

Модель позволяет смоделировать сработки из водохранилищ с полугодовыми и годовыми режимами сброса воды. Под такие категории подоходят Киевское и Каневское водохранилища (рис. 3, рис. 4). Видно, что модельный

сброс воды удовлетворительно описывает реальную сработку водохранилищ, при этом модель периодически завышает величину сброса воды. Вероятно, это связано с тем, что на данном этапе использования модели не происходило усвоение данных об орошении. Соответственно, модель отображает расходы с теми излишками, которые должны использоваться для орошения.

Моделирование Кременчугского водохранилища показало неудовлетворительный результат. Для выяснения проблемы был проведен спектральный анализ (методом максимальной энтропии [3]) суточных данных сработки водохранилища за период 2002 – 2005 гг.

Это было необходимо для того, чтобы выяснить особенности режима сработки данного водохранилища исследуемого региона.

Результаты анализа, показанные на рис. 5, показали, что значимыми (основ-

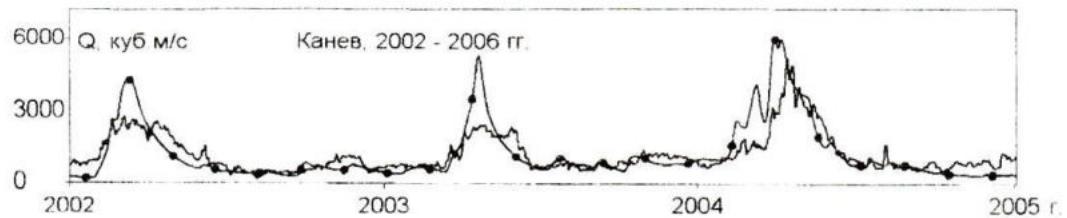
ные составляющие режима сработки) гармониками в режиме сработки является годовая, полугодовая и недельная. Недельная гармоника, как выяснилось, обусловлена работой гидроэлектростанции на водохранилище.

Модель HYPE не предусматривает подобный режим сработки для зарегу-

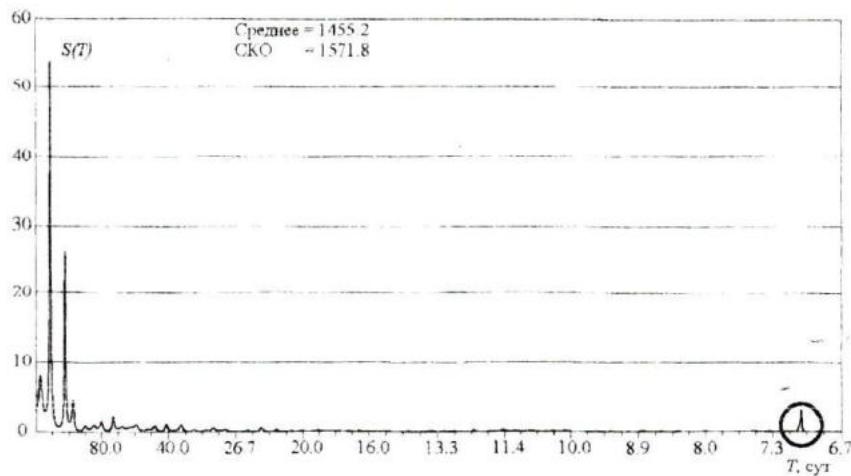
лированных водохранилищ. Для того, чтобы справиться с данной проблемой необходимо переработать программный блок модели, отвечающий за режим сработки из водохранилищ, а также все блоки связанные с ним.



Р и с. 3. Модельные (—●—) и наблюденные (—) среднесуточные сработки ( $\text{м}^3/\text{сут}$ )  
Киевского водохранилища



Р и с. 4. Модельные (—●—) и наблюденные (—) среднесуточные сработки ( $\text{м}^3/\text{сут}$ )  
Каневского водохранилища



Р и с. 5. Спектральный анализ методом максимальной энтропии данных сработки  
Кременчугского водохранилища

Были проведены несколько доработок в модели. Первая из них – добавление семисуточного режима сработки водохранилища (рис. 6). Вторая – введение специального режима сработки во-

дохранилищ. Второй метод включает в себя моделирование полугодового и годового режима сработки, также он учитывает и семисуточный режим сра-

ботки, но как осредненную величину (рис. 6).

Моделирование для Днепродзержинского, Днепровского и Каховского водохранилищ проводилось по аналогии с вышеупомянутыми, и результаты расчета для них здесь не приводятся. В табл. 1 приведена оценка результатов в

виде сравнения модельных данных и наблюденных с помощью коэффициентов эффективности. В качестве критериев согласования использовались: коэффициент Неша-Сатклифа (N), логарифмический коэффициент Неша-Сатклифа ( $\ln N$ ), коэффициент корреляции (R), коэффициент согласования (D) [1].

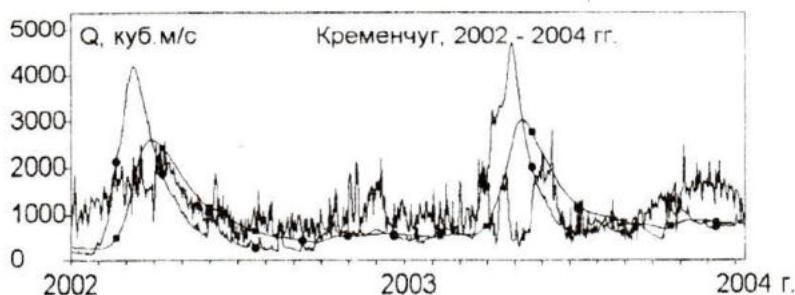


Рис. 6. Модельные с добавлением семисуточного режима (—●—), с осреднением семисуточного режима (—■—) и наблюденные (—) среднесуточные сработки ( $\text{м}^3/\text{сут}$ ) Кременчугского водохранилища

Таблица 1

Критерии эффективности после применения параметризации для режима сработки воды из водохранилищ: коэффициент Неша-Сатклифа (N), логарифмический коэффициент Неша-Сатклифа ( $\ln N$ ), коэффициент корреляции (R), коэффициент согласования (D)

Название водохранилища	D	N	R	$\ln N$
Киевское водохранилище	0.87	0.37	0.80	-0.36
Каневское водохранилище	0.88	0.42	0.82	0.33
Кременчугское водохранилище	0,66	-0,04	0,43	0,26

**Выводы.** Таким образом, гидрологическая модель HYPE применима для рек со сложной системой зарегулирования. Предложенная параметризация для моделирования сработок водохранилищ каскада реки Днепр улучшила результаты расчета по сравнению с стандартной, имеющейся в модели.

В результате сравнения полученных результатов (табл. 1) было выяснено, что данный подход лучше применим для Каневского водохранилища из-за наличия четко выраженного сезонного хода. Для Кременчугского водохранилища данная параметризация менее пригодна т.к. коэффициент  $N = -0,04$ , видимо, из-за непланомерных попусков.

Дальнейшее улучшение параметризации требует более детального анализа данных наблюдений за более длительный период.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФИ «Пространственное моделирование экстремальных ливневых паводков в бассейнах рек западного Кавказа на примере р. Адагум. Геоинформационный подход», код «мол\_ир».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Göran Lindström, Charlotta Pers, Jörgen Rosberg, Johan Strömqvist and Berit Arheimer. Development and testing of the HYPE water quality model for different spatial scales. – 2009. – 28 p.
2. <http://e-hypeweb.smhi.se/timeseries/>
3. Кей С.М., Марпл С.Л. Современные методы спектрального анализа. – 1981. – 47 с.