

ВАЛИДАЦИЯ МОДЕЛИ РЕЧНОГО СТОКА HYPE (HYDROLOGICAL PREDICTIONS FOR THE ENVIRONMENT) ДЛЯ УКРАИНСКИХ РЕК

*Н.Ф. Кириленко, Е.М. Лемешко,
Ю.П.Ильин*, Funkquist Lennart***

Морской гидрофизический институт
НАН Украины

г. Севастополь, ул. Капитанская, 2

E-mail: Evgeny.Lem@gmail.com

*МО УкрНИГМИ

г. Севастополь, ул. Советская, 61

**Swedish Meteorological and
Hydrological Institute, Sweden

В статье представлены результаты сравнительного анализа расчетов по оперативной гидрологической модели Hydrological Predictions for the Environment (HYPE) и данных о стоке рек Украины за период 1980-2006 гг. Модель HYPE в рамках проекта OPERR (Operational Pan-European River Runoff) была адаптирована для бассейна водосбора Черного моря. Для оценивания качества модельных расчетов стока рек использовался ряд статистических критериев. Обсуждаются возможные причины расхождения модельных и натурных данных. Сделан вывод о пригодности модели для рек Украины и обсуждаются пути улучшения качества модельных данных.

Введение. Речные бассейны и формирующийся в них сток являются одним из важнейших объектов исследования в задачах гидрологии суши и в океанологии. Причем в последней интерес к этим объектам обусловлен необходимостью улучшения оценки баланса вод внутренних морей и влияния речного стока на гидрофизические процессы в прибрежной зоне. В последнее десятилетие стало возможным использовать спутниковые данные по гравиметрии (проект GRACE [1]), на основе которых получены оценки влагозапаса почвы различных регионов Земли [2]. Обобщен и систематизирован в виде архивов большой объем информации о состоянии водной и воздушной сред, характеристиках почв и т.п. (например, массивы CRU <http://www.cru.uea.ac.uk/>, CORINE <http://www.eea.europa.eu/data-and->

maps/data/corine-land-cover-2006-raster-2, ERA-Interim <http://www.ecmwf.int/research/era/>). Все это сформировало основу для создания оперативных численных гидрологических моделей, работающих как в диагностическом, так и в прогностическом режимах. Применение таких моделей к гидрологическим объектам Украины имеет несомненную практическую значимость.

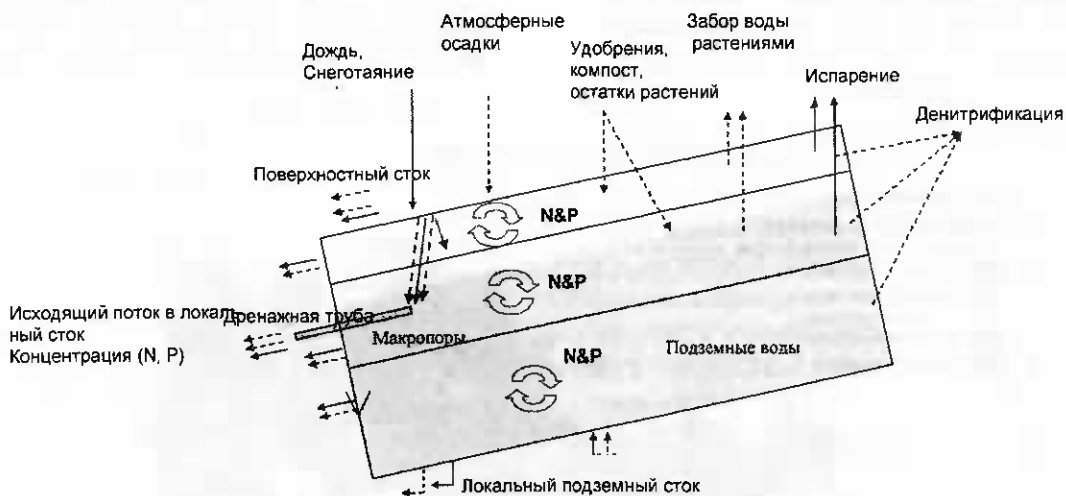
В работе представлены результаты сравнительного анализа расчетов по оперативной гидрологической модели Hydrological Predictions for the Environment (HYPE) [3] и данных натуральных измерений. Модель HYPE изначально разрабатывалась для бассейна Балтийского моря, однако в рамках проекта OPERR (Operational Pan-European River Runoff) была адаптирована для всей европейской территории, включая бассейн водосбора Черного моря, с целью валидации результатов моделирования по данным наблюдений стока воды для основных украинских рек.

Описание модели HYPE. HYPE (The Hydrological Predictions for the Environment) [3] является полупараметрической гидрологической моделью стока воды и ее качества (включая источники азота и фосфора), разработанная Шведским метеорологическим и гидрологическим институтом (SMHI). Основная цель разработки – создание модели, с одной стороны, учитывающей специфику и всю сложность гидрологических процессов, формирующих сток воды и взвешенного вещества; с другой стороны, сохраняющей «прозрачность и простоту» машинного кода, позволяющего адаптировать модель под особенности различных гидрологических объектов. Компьютерный код (FORTRAN 95) организован таким образом, чтобы эффективно проводить расчеты для больших территорий с высоким пространственным разрешением и так, чтобы выходные данные и результаты моделирования можно было использовать в геоинформационных системах.

В основе модели HYPE лежит мульти-бассейновая концепция, предполагающая одновременное моделирование речных бассейнов, площадь водосбора которых разбивается на суббассейны,

площадь водосбора которых разбивается на суббассейны, для которых рассчитываются все компоненты гидрологического баланса (рис.1). Так же введена классификация по типам почв и условиям их сельскохозяйственного использования (рис.2). В связи с этим большая группа

основных переменных в модели введена для описания характеристик и тип почв, есть также и глобальные параметры, характеризующие рассматриваемый бассейн в целом (всего более ста коэффициентов, констант и параметров).



Р и с. 1. Основные процессы, формирующие локальный (в пределах одного суббассейна) сток воды и биогенов, используемые в параметризации для модели HYPE

Вертикальное разрешение модели включает три уровня почвы, глубина залегания которых может задаваться произвольно. Удерживающая способность почв (зависящая от количества доступной воды в растительном покрове и общей пористости почв) определяется их типом. Следовательно, расчет водного баланса ведется для каждого слоя почвы в отдельности с учетом их увлажненности. Расчет стока грунтовых вод ведется в зависимости от доли заполненных ими макропор соответствующего грунтового слоя. Помимо поверхностного и грунтового стока, HYPE позволяет проводить расчет эрозийных процессов и потока макропор как дополнительных факторов, влияющих на формирование стока. Расчет поверхностного стока ведется с учетом озер и водохранилищ в пределах системы суббассейнов.

Расчет гидрологических элементов стока и качества вод в модели HYPE проводится с усвоением сеточных данных массивов ре-анализа (например, CRU, ERA-Interim) гидromетеорологических полей по осадкам, температурам воздуха и воды, а также данным по ха-

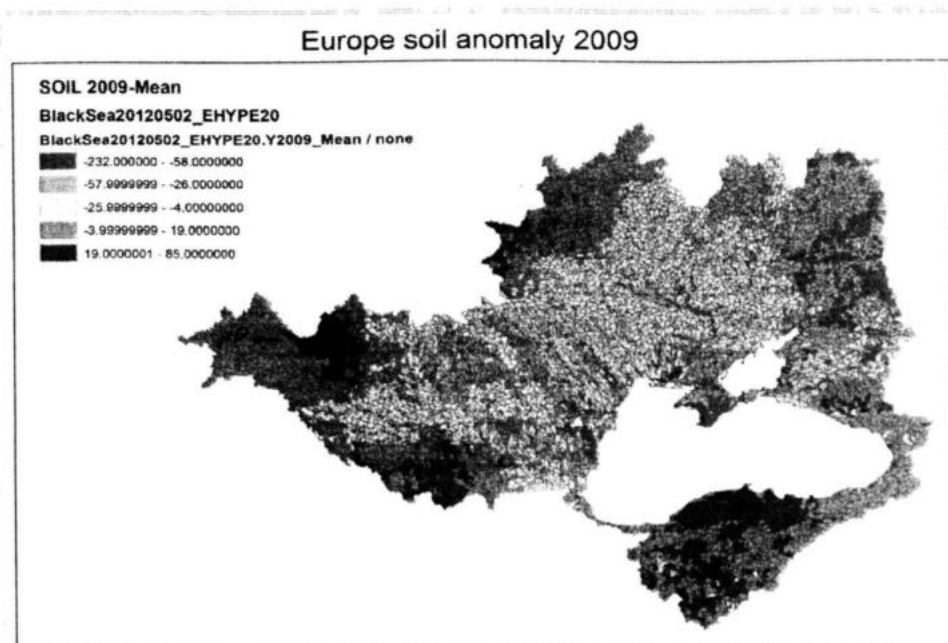
рактеристикам почв (CORINE), также имеется возможность учитывать объемы безвозвратного водопотребления. При моделировании транспорта биогенов одновременно учитываются как неорганические, так и органические источники азота N и фосфора P, в том числе источники минеральных удобрений, растительных остатков и примесей атмосферного осаждения, также как и процессы поглощения этих элементов, растениями. Расчет потока биогенов проводится совместно с расчетом стока воды и включает в себя все процессы трансформации веществ в озерах и реках, такие как денитрификация, минерализация, производство первичной продукции, седиментация и др.

Исходные данные и начальные условия. Площадь водосбора Черного моря составляет около 2.3 млн. кв.км. Для ее разбивки на суббассейны использовался массив рельефа земной поверхности и технология GIS [3]. В данной работе количество суббассейнов, то есть элементарных бассейнов водосбора (рис.1) составило 10600. Минимальная площадь суббассейна составила 10 кв.км., макси-

мальная - 1430 кв.км, средняя площадь – 158 кв.км.

Площадь водосбора Дуная равна 817 тыс. кв.км, то есть около 36% от всей площади дренажного бассейна Черного моря. Поэтому, проверка модельных расчетов в первую очередь проводилась для Дуная. В качестве входных суточных данных использовалась информация ERA-Interim об осадках и температуре воздуха.

Бассейн реки Дунай расположен в умеренно теплом поясе и по особенностям климатических условий может быть разделен на три отдельные зоны: *Бассейн Верхнего Дуная* с сравнительно суровым климатом; *Бассейн Среднего Дуная*, отличающегося засушливым континентальным климатом; *Бассейн Нижнего Дуная* с еще более засушливым континентальным климатом, очень жарким летом и холодной зимой [4].



Р и с. 2. Пример разделения бассейна водосбора Черного моря на суббассейны и аномалии влагозапаса почвы

В верхнем бассейне средняя температура января колеблется в пределах $-0,8^{\circ}$ - -3°C на равнине или -6° - -13°C в горах. Лето жаркое со средними температурами в июле $17-20^{\circ}\text{C}$ и максимальными, достигающими $36 - 38^{\circ}\text{C}$. Средние температуры июля в бассейне Среднего Дуная колеблются от 20 до 23°C с максимальными температурами до 39°C . Средняя температура января в этом регионе составляет $-0,3 - -2^{\circ}\text{C}$ (на равнине) или $-5 - -9^{\circ}\text{C}$ (в горах), и минимальными до -34°C . В свою очередь, для района Нижнего Дуная характерны более низкие температуры воздуха зимой. Так средняя температура января от -2 до -6°C . Минимальная температура может достичь -35°C . Осадки по территории бассейна р. Дунай распределяются неравномерно. С увеличением высоты количество осад-

ков возрастает. Средняя годовая сумма осадков на равнинных участках составляет $500 - 600$ мм, в Карпатах - $1000 - 2000$ мм, в Альпах - $1800 - 2500$ мм и выше. Наименьшее количество осадков выпадает в приустьевой части Дуная [4].

Для настройки модели использовались приведенные выше физико-географические данные и данные о сельскохозяйственной деятельности и безвозвратном водопотреблении, осредненные по отдельным годам. Входные данные задавались из суточных массивов данных ERA Interim об осадках и температуре воздуха для каждого суббассейна.

Валидация модельных данных НУРЕ. Для проверки качества модели НУРЕ расчетные характеристики модельных значений для среднесуточных величин за период 1980-2006 гг. сравнивались с среднесуточными значениями

по стоку воды для замыкающего створа реки. Таким образом, расчет и сравнение производились для площади водосбора р. Дунай (пост Рени) не включая дельту, и общая площадь водосбора составляла 812800 кв. км. После настройки и калибровки модель была запущена в режиме расчета для периода 1980-2006 гг. При оценивании согласования модельного стока с наблюдаемым использовался ряд критериев (табл. 1), принятых в гидрологическом моделировании [5].

Результаты и обсуждение. Используя модель HYPE, был получен расчетный ряд суточного стока воды, представленный на рис. 3 совместно с рядом стока воды, полученного по данным наблюдений по стоку воды в замыкающем створе р. Дунай (пост Рени, [6]). Данные суточного разреза стали основой для расчета многолетних рядов среднемесячного и годового стока за период 1980-2006 гг.

Для режима стока воды на нижнем Дунае и в дельте реки характерны хорошо выраженное длительное и высокое весеннее-летнее половодье, сформированное талыми и дождевыми водами, и летнее-осенняя межень [6]. Весеннее-летнее половодье обычно отмечается в марте – июле, летнее-осенняя межень – в августе-октябре. В целом можно сделать вывод, что модель очень хорошо описывает общие черты изменения стока воды в реке. В подтверждение хорошего качества модельных данных особенно следует выделить период с 1989-1991 гг. (рис 3), когда наблюдается значительное уменьшение водности реки. Из литературных источников известно, что в 1987-1991 гг. началось строительство защитной дамбы вдоль правого (румынского) берега Дуная от Браилы до Исакчи. Выход воды на пойму был прекращен в 1988 г., что и отображено на графике, а модель, в свою очередь, прекрасно воссоздала этот период.

Тем не менее, даже беглый анализ рис. 3 позволяет сделать вывод об общем занижении величины стока моделью HYPE, несмотря на согласованный ход двух рядов. Наиболее ярко эта разница

между рядами проявляется в ходе годового стока воды.

Существуют несколько факторов, влияющих на результаты гидрологического моделирования, среди которых основным является неверный учет безвозвратного водопотребления. Как известно из [6] основная часть водного стока Дуная формируется в верхнем и особенно среднем течении реки, т.е. выше Железных ворот, где Дунай пересекает Карпаты (пост Оршова). Благодаря этому можно говорить о том, что введение в строй водохранилищ на Нижнем Дунае оказало минимальное влияние на сток воды в вершине дельты. Кроме того, во второй половине XX века наблюдается возрастание водности реки, что связано с климатическими изменениями и, в том числе, с увеличением атмосферных осадков в Европе в это время.

В таком случае увеличение водного стока Дуная объясняется скорее естественными причинами, чем действием возможного антропогенного фактора - безвозвратными потерями стока. К тому же основное увеличение водности реки пришлось как раз на период возросших заборов воды на хозяйственные нужды и регулирования стока водохранилищами. Из литературы известно, что современное безвозвратное водопотребление в бассейне Дуная составляет 13-15 км³/год, однако эти цифры, по-видимому, завышены [4,6].

Таким образом, наиболее вероятной причиной занижения результатов может быть недоучет приходных компонент водного баланса, таких как дождевые осадки, осадки в виде снега и влагозапаса почвы.

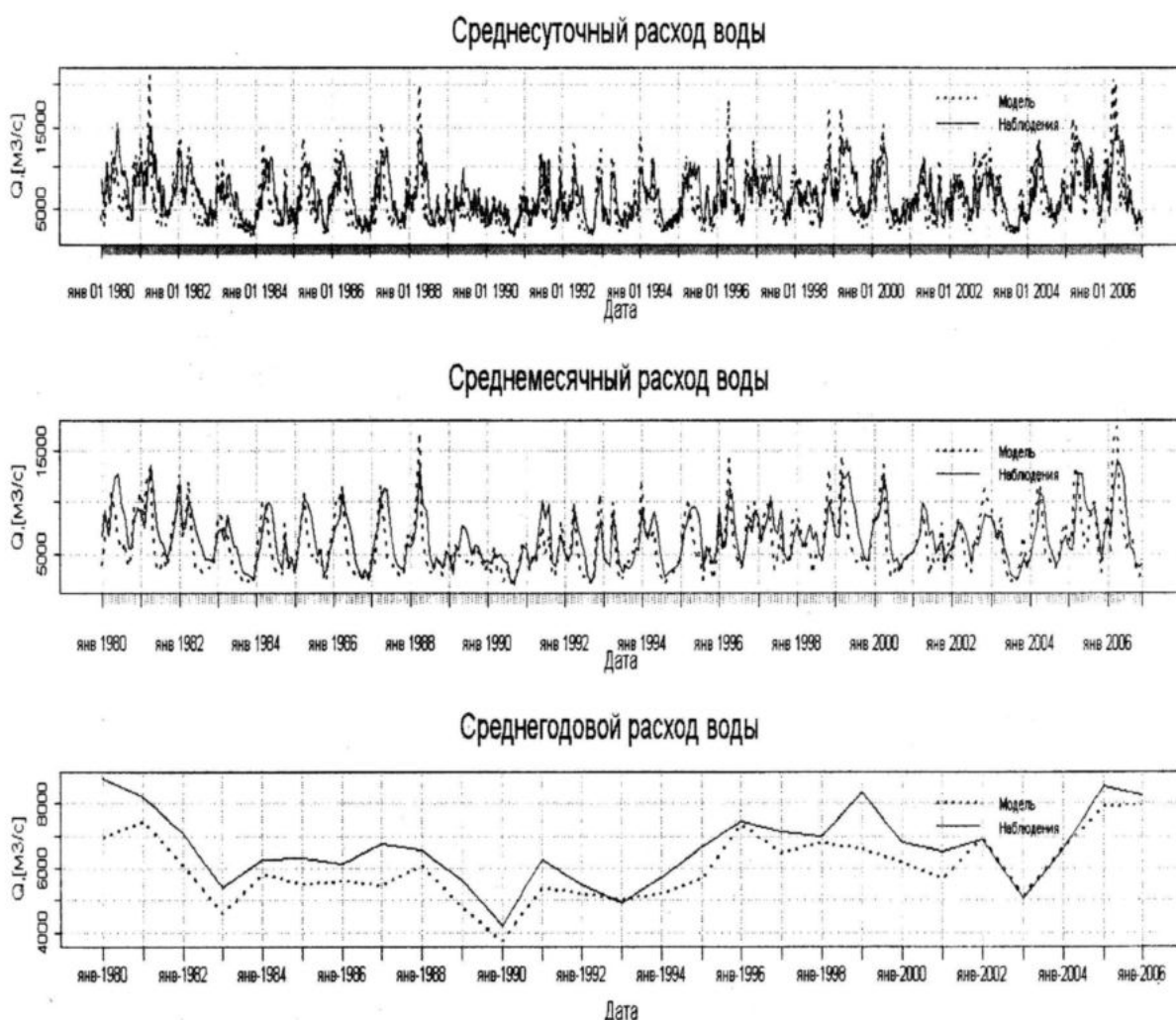
В качестве подтверждения занижения данных ре-анализа по осадкам можно привести результат сравнения с данными наблюдений на метеорологической станции Измаила за период 1945 -1995 гг., где периодам с максимальной среднегодовой суммой осадков (5-7 месяцы) соответствует более низкая корреляционная связь с данными ре-анализа ($r < 0.5$) [7].

Критерии согласования результатов моделирования и наблюдаемых величин, использованных в работе

Название	Формула	Описание
Произведение коэффициента детерминации и углового коэффициента регрессии	$br2 = \begin{cases} b R^2, & b \leq 1 \\ \frac{R^2}{ b }, & b > 1 \end{cases}$	Рассчитывается путем умножения коэффициента детерминации (R2) на угловой коэффициент линии регрессии (b) между модельным и наблюдаемым стоком. Критерий полезен в том случае, если модель систематически завышает (занижает) значения стока притом, что величина R2 может иметь значение близкое к 1 [5].
Средняя абсолютная ошибка	$mae = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_i - O_i $	Рассчитывается как средний модуль разности модельных и наблюдаемых значений
Средняя квадратичная ошибка	$rmse = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - O_i)^2}$	RMSE характеризует стандартное отклонение ошибки модели. Низкие значения RMSE указывают на высокое качество модели.
Процент систематического отклонения	$PBIAS = 100 \frac{\sum_{i=1}^N (S_i - O_i)}{\sum_{i=1}^N O_i}$	PBIAS оценивает в среднем тенденцию модели к завышению или занижению величины стока. Оптимальные значения PBIAS должны быть близкими к 0. Положительные значения указывают на переоценку стока моделью, отрицательные – наоборот.
Индекс согласования	$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^N (S_i - \bar{O} + O_i - \bar{O})^2}$	Индекс согласования (d) разработан [8] в качестве нормированной меры отклонения модели и изменяется в пределах от 0 до 1. 1-означает полное согласование, 0-означает абсолютное несоответствие данных. Индекс согласования показывает степень расхождения в средних значениях и дисперсии сравниваемых рядов, однако этот критерий чувствителен к экстремальным выбросам [9].
Критерий Nash-Sutcliffe	$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}$	Область значений критерия определена в диапазоне от $-\infty$ до 1. При этом, чем ближе значение NSE к 1, тем точнее модель описывает наблюдаемый сток. Значение NSE = 0 показывает, что точность модели соизмерима со средним значением данных наблюдений; отрицательные значения критерия ($-\infty < NSE < 0$), свидетельствуют о том, что среднее значение, рассчитанное по данным наблюдений, является лучшим предиктором, чем модель.
Критерий Kling-Gupta	$KGE = 1 - \sqrt{\frac{[s_1 \cdot (r - 1)]^2 + [s_2 \cdot (\alpha - 1)]^2 + [s_3 \cdot (\beta - 1)]^2}{3}}$ где s_i – факторы, масштабирующие пространство критериев r , α , β . По умолчанию значения этих факторов приняты равными 1.	Индекс KGE является модификацией критерия NSE и позволяет учитывать при оценке степени согласования рассматриваемых рядов относительный вклад отдельных компонентов NSE: - r : коэффициент корреляции; - α : отношение между стандартными отклонениями данных наблюдений и модели; - β : отношение средних значений модельного и измеренного вариационных рядов. Область значений KGE определена в диапазоне от $-\infty$ до 1. При этом, чем ближе значение KGE к 1, тем точнее модель описывает наблюдаемый сток.

Другими словами, данные ре-анализа в узловой точке вблизи Измаила (28.75°E, 45.25°N) неудовлетворительно описывают многогодный период года. Поскольку осадки являются задаваемы-

ми входными данными модели, то корректирование данных ре-анализа осадков по данным наблюдений повлечет за собой улучшение модельных данных.



Р и с. 3. Многолетний ход суточного(а), месячного(б) и годового(в) стока воды в замыкающем створе р.Дунай (п Рени) по данным наблюдений и модели НУРЕ

Суточный ход стока имеет минимальные величины в 1987, 1999, а максимальные - 1988, 2005, 2006. В современных условиях (1971-2002 гг.) на долю марта-июля приходится 50,7% годового стока воды, наиболее многоводные месяцы - это апрель (11,6%), май (11,6%), июнь (10,0%). Следовательно, из сравнения модельных данных и наблюдений (рис. 3) можно сделать вывод, что модель не учитывает значительное количество воды во время второй фазы половодья. Авторы предполагают, что в данных ре-анализа занижено количество

именно дождевых осадков, т.к. по литературным данным более половины годовой суммы осадков выпадает в теплое время года (апрель-сентябрь) большей частью в виде ливней. На этот период приходятся абсолютные максимумы (июль) суточного количества осадков за весь период наблюдения 1945-2003 гг., для ст. Измаил, ст. Вилково.

Как видно из таблицы 2 удовлетворительный результат расчета по модели для всех критериев приходится на период осенне-зимних месяцев (межень), в то время как самые низкие значения опре-

деляют период второй фазы половодья, где в подтверждение предыдущих результатов, отображается недоучет воды. Но следует отметить, что при всех сложностях моделирования стока общих (го-

довой) коэффициент корреляции между значениями наблюдение-модель составляет 0.76 – достаточно высокий. Минимальный коэффициент корреляции приходится на февраль, когда

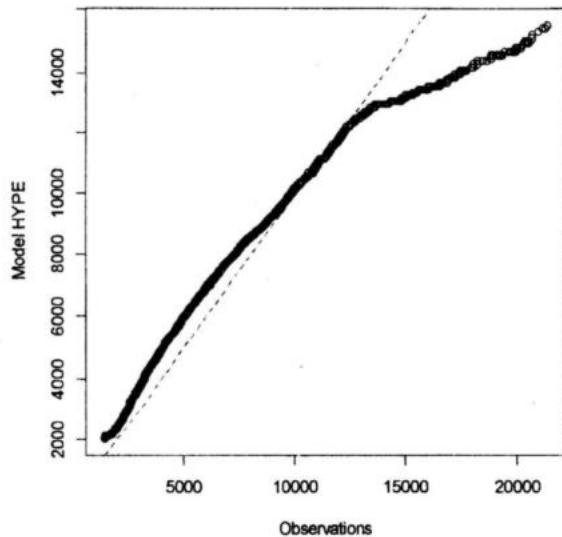
Таблица 2

Средние многолетние критерии, рассчитанные для р. Дунай за период 1980-2006 гг.

Критерий	Месяцы												Год
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
r	0.85	0.71	0.89	0.86	0.74	0.83	0.82	0.83	0.91	0.91	0.94	0.91	0.76
R2	0.73	0.5	0.79	0.74	0.54	0.69	0.67	0.68	0.83	0.83	0.89	0.83	0.58
bR2	0.69	0.49	0.68	0.7	0.37	0.38	0.41	0.56	0.77	0.79	0.83	0.77	0.53
MAE	1180	1200	1470	1608	2900	3630	2340	1240	781	870	1010	945	1600
RMSE	1540	1630	2110	2080	3340	3910	2670	1545	960	1130	1290	1265	2145
PBIAS	6.2	2.6	15.2	4.0	-30.6	-45.7	-36.5	-17.6	-8.8	2.3	2.0	6.4	-9.5
d	0.9	0.82	0.86	0.89	0.66	0.58	0.63	0.86	0.93	0.93	0.93	0.93	0.86
NSE	0.53	0.08	0.09	0.38	-0.9	-1.5	-0.64	0.49	0.69	0.58	0.54	0.64	0.36
KGE	0.69	0.54	0.41	0.53	0.59	0.41	0.42	0.74	0.77	0.58	0.47	0.67	0.69

происходит окончание зимнего периода, перед началом весеннего половодья. Видимо, нарушение связи происходит за счет слабого учета в модели влияния ледовых явлений в зимний период. Что и подтверждает коэффициент детерминации (0.5- минимальная доля), который описывает долю изменчивости реального процесса. Остановившись на критерии PBIAS, оценивающим завышение (занижение) результатов модельного расчета, можно сказать, что семь месяцев модельный расчет незначительно переоценивает сток по данным наблюдения (за исключением марта - периода пика первой фазы половодья), а, начиная с мая по сентябрь – расчет чрезвычайно недооценивает сток, что связано с занижением количества осадков по данным ре-анализа. Индекс согласованности (d), отображающий степень расхождения в средних значениях и дисперсии, показывает, что ряды согласованы (0.86 - годовое значение), т.к. все значения отображают результат >50% и стремятся к 1. Оценивая средний модуль разности (MAE) и стандартное отклонение ошибки модели (RMSE) можно заключить, что

модель в целом удовлетворительно воспроизводит режим стока воды, т.к. все средние многолетние и годовые значения MAE, за исключением периода с мая по июль, не превышают самое минимальное значение стока воды по данным наблюдения за период 1980-2006 гг. Согласно критериям NSE и KGE (табл.1) в зимний период модель описывает сток воды в реке удовлетворительно, в летний период качество модельных расчетов ухудшается, с августа по декабрь модельные расчеты максимально адекватны данным наблюдения. Несмотря на занижение стока по абсолютной величине, и некоторое нарушение согласованности временных рядов, модель HYPE вполне удовлетворительно отражает статистическое распределение стока. Для сравнения статистических структур моделируемого и реального стока р. Дунай, был построен график (рис. 4) совместных квантилей распределения стока воды. Анализ графика показал, что при величинах до 13000 м³/сек HYPE удовлетворительно воспроизводит статистику стока. При больших значениях квантили HYPE дают заниженные значения.



Р и с. 4. Совместный график квантилей распределения стока по модели HYPE и наблюдениями в п Рени

В свою очередь, модельные расчеты для р. Днепр и р. Южный Буг оказались менее удовлетворительными. Для речных бассейнов Юж.Буга и Днестра модель дает завышение величины стока. Для Ю.Буга максимальная корреляция между модельным и наблюдаемым стоком достигает 0.82 в зимний период, минимальная 0.4 - в марте. Для Днестра корреляции соответственно 0.63 в конце лета - начале осени и 0.23 - в мае. Одна из причин ухудшения качества моделирования стока воды для реки Южный Буг и особенно реки Днепр заключается в следующем. Основными факторами, определяющими величину стока Днестра, являются: зарегулирование, безвозвратный водозабор и дополнительные потери на испарение с поверхности шести основных водохранилищ. Кроме того, днепровскую воду потребляет более половины населения страны (более 1000 населенных пунктов, из которых 50 - крупные города), на ней работает около 10 тыс. промышленных предприятий Украины, она орошает почти 1,5 млн. га сельскохозяйственных угодий. Особенностью Южного Буга является почти полное отсутствие крупных притоков. Бассейн Южного Буга относится к такому типу рек, где преобладают реки с пе-

риодическим стоком только в период снеготаяния или после выпадения ливневых осадков. Условия формирования подземных вод, а, следовательно, и условия питания рек существенно ухудшаются. Реки дренируют подземные воды трещинных кристаллических пород и продукты их разрушения, которые отличаются сравнительно небольшой водообильностью. Поэтому все малые реки в бассейне Южного Буга летом пересыхают. Возможно, комплекс этих факторов оказался трудно воспроизводим в рамках рассматриваемой численной модели. На наш взгляд, для достижения лучшего результата расчета по модели (и соответственно сравнение с натурными данными) необходимо более детально параметризовать затраты на испарение для водохранилищ и безвозвратные потери. Для этого необходимо рассмотреть отдельные суббассейны, останавливаясь на каждом водохранилище Днепроовского каскада. Подводя итоги, можно сделать вывод, что для обеих рек причины ошибок расчетов схожи и требуют дополнительной настройки модели на гидрометеорологические условия региона.

Подводя итог проделанной работе, демонстрации и обсуждению результатов исследования для реки Дунай по среднемесячным данным стока воды за период 1980-2006 гг., можно сделать вывод, что модель показывает очень хороший результат, с незначительными изъянами, которые подлежат уточнению и корректировке в скором времени.

Выводы. Долговременные расчеты стока воды с использованием модели HYPE за период 1980-2006 гг. продемонстрировали удовлетворительные результаты для рек Украины. Для р.Дунай отмечено наилучшее согласование модельного и наблюдаемого стока воды. Для остальных речных бассейнов (Юж.Буг, Днепр) модель дает завышение величины стока. Однако, относительно высокие коэффициенты корреляционной связи в течение сезонного цикла и других статистических критериев (табл. 2)

между модельными расчетами и наблюдениями свидетельствует о перспективности применения модели к условиям украинских рек, особенно для рек, на которых отсутствуют регулярные гидрологические наблюдения. Для улучшения качества модельных расчетов стока воды следует использовать данные ре-анализа по осадкам, откорректированным по наблюдениям на сети метеорологических постов Украины.

Направления дальнейших исследований для улучшения качества гидрологических расчетов по модели HYPE представляются в следующем виде:

- выбор или коррекция различных продуктов ре-анализа на основе верификации данных по температурам воздуха и осадкам для территории Украины;
- более адекватный учет доли осадков, выпавших в виде снега, для улучшения точности модельных расчетов в период начальной фазы весеннего половодья;
- более детальная разбивка на суббассейны и представление почвенного покрова и типов растительности для каждого бассейна реки и внесение соответствующих корректировок в модели HYPE;
- уточнение зарегулирования и потерь на испарение с поверхности водохранилищ, а также безвозвратного водозабора на нужды коммунального и сельского хозяйства.

Авторы благодарят за поддержку проект OPERR (Operational Pan-European River Runoff), контракт № 263400, в рамках которого была выполнена данная работа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Wahr, J., Molenaar, M., and Bryan, F.* Time variability of the Earth's gravity field: Hydrological and oceanic effects and their possible detection using GRACE // *J. Geophys. Res.* – 1998. – Vol. 103, No. B12, – P. 30,205–30,229.
2. *Лемешко Е.М., Кириленко Н.Ф.* Опыт использования данных GRACE для оценивания компонент водного баланса внутренних морей и бассейнов рек // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.* – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2010.– вып. 23.– С. 88 – 94
3. *Lindström G., Pers C., Rosberg J., Strömqvist J., Arheimer B.* Development and test of the HYPE (Hydrological Predictions for the Environment) model - A water quality model for different spatial scales // *Hydrol. Res.* – 2010. – V. 41, 3–4. – P. 295–319.
4. *Никифоров Я.Д., К.Дьякону.* Гидрология устьевой области Дуная.– М. Гидромет. 1963. – 383 с.
5. *Krause P., Boyle D. P., Base F.* Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment // *Adv. Geosci.* – 2005. – V.5. – P.89 – 97.
6. *Михайлов В.Н.* Гидрология дельты Дуная.– М. Геос. 2004. – 448 с.
7. *Лемешко Е.М., Кириленко Н.Ф., Лемешко Е.Е.* Моделирование многолетнего стока реки по данным ре-анализа: пример бассейна Дуная за 1901-2002 гг. // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.*– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2009.– вып. 19.– С. 234 – 243.
8. *Willmott C. J.* On the validation of models // *Phys. Geography.* – 1981. – V.2. – P. 184–194.
9. *Legates D. R., G. J. McCabe Jr.* Evaluating the Use of "Goodness-of-Fit" Measures in Hydrologic and Hydroclimatic Model Validation // *Water Resour. Res.* – 1999. – V.35(1). – P. 233–241.