

УДК: 504.4.054

**В. В. Брук**, канд. техн. наук, **В. С. Кресин**, канд. техн. наук,

**Е. Л. Макаровский**, канд. техн. наук

(УкрНИИЭП)

## **ГИС-МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЗАГРЯЗНЕНИЯ РЕЧНЫХ ВОД МЕТАЛЛАМИ**

*В работе исследованы возможности применения геоинформационной системы (ГИС) при моделировании загрязнения речных вод в климатических условиях Украины для бассейна реки с большой площадью, характеризующегося высокой плотностью населения и высоким уровнем развития промышленности. В качестве района исследований был выбран бассейн р. Северский Донец (украинская часть). Исследования выполнялись в рамках проекта 7-й Рамочной программы ЕС EnviroGrids.*

**Ключевые слова:** геоинформационная система, моделирование процессов загрязнения речных вод, SWAT-моделирование, расход речной воды.

При моделировании процессов загрязнения речных вод необходимо учитывать различные факторы, связанные с пространственным расположением точечных и диффузных источников загрязнения, а также с пространственным распределением характеристик водосборных территорий и диффузных источников загрязнения. Для эффективного учета пространственных факторов при выполнении моделирования представляется целесообразным использование геоинформационных систем (ГИС). Например, в [1] ГИС применяется для моделирования качества воды интерполяционными методами.

В геоинформационной системе ArcGis для моделирования процессов загрязнения речных вод может быть использовано специальное расширение к ГИС — ArcSWAT, которое представляет собой графический интерфейс модели SWAT (Soil and Water Assessment Tool) [2]. ArcSWAT ранее успешно применялся при моделировании процессов формирования речного стока для относительно небольших по площади бассейнов рек в климатических условиях США и Ирана [3-4]. *Цель данной работы* — исследовать возможности применения геоинформационной системы при моделировании загрязнения речных вод в климатических условиях Украины для бассейна реки с большой площадью, характеризующегося высокой плотностью на-

селения и высоким уровнем развития промышленности. В качестве района исследований был выбран бассейн реки Северский Донец (украинская часть). Исследования выполнялись в рамках проекта 7-й Рамочной программы ЕС EnviroGrids (контракт № 226740).

SWAT-моделирование позволяет выполнять модельные расчеты следующих характеристик речного стока: расход речной воды в устьевых створах подбассейнов, массовые расходы ряда неконсервативных веществ (соединений азота, фосфора, органических веществ) и трех заданных консервативных веществ (металлов). В данной работе мы ограничились моделированием процессов загрязнения речных вод металлами.

Подготовительный этап моделирования включал следующие подэтапы работ:

- оконтуривание границ водосборной территории и выделение на ней речной сети и территорий подбассейнов;
- выделение на водосборных территориях гидрологически однородных единиц, характеризующихся (в рамках используемой модели) одинаковыми видами землепользования, типами почв и уровнем наклона поверхности;
- нанесение на карту точечных источников загрязнения и формирование таблицы с данными о расходах и составе сточных вод;
- нанесение на карту станций мониторинга погодных условий и формирование таблицы среднестатистических значений метеорологических параметров;
- формирование таблиц с данными по фактическим суточным экстремумам температуры воздуха и суточным атмосферным осадкам.

Для оконтуривания водосборной территории и территорий подбассейнов была использована цифровая карта высот (DEM) Украины с пространственным разрешением 90 м, построенная на основе космической съемки специальной радарной системой, включающей радиолокационные сенсоры SIR-C и X-SAR. Всего было выделено 66 подбассейнов и соответствующих главных водотоков (рис. 1). Для всех выделенных водосборов были рассчитаны требуемые параметры: площадь водосбора, средняя, минимальная и максимальная высоты, средний уклон, координаты и другие характеристики.

Для формирования таблицы с данными о расходах и составе сточных вод различных точечных источников загрязнения были проанализированы формы годовой отчетности по водоотведению предприятий-водопользователей (2ТП-водхоз) более чем для 400-х предприятий Харьковской, Донецкой и Луганской областей, сбрасывающих возвратные воды в водотоки бассейна р. Северский Донец. Из точечных источников загрязнения, расположенных в пределах украинской части бассейна р. Северский Донец, были выбраны 23 выпуска возвратных вод, оказывающие наиболее существенное влияние на формирование качества речных вод. При выборе источников загрязнения принимались во внимание два основных показателя:

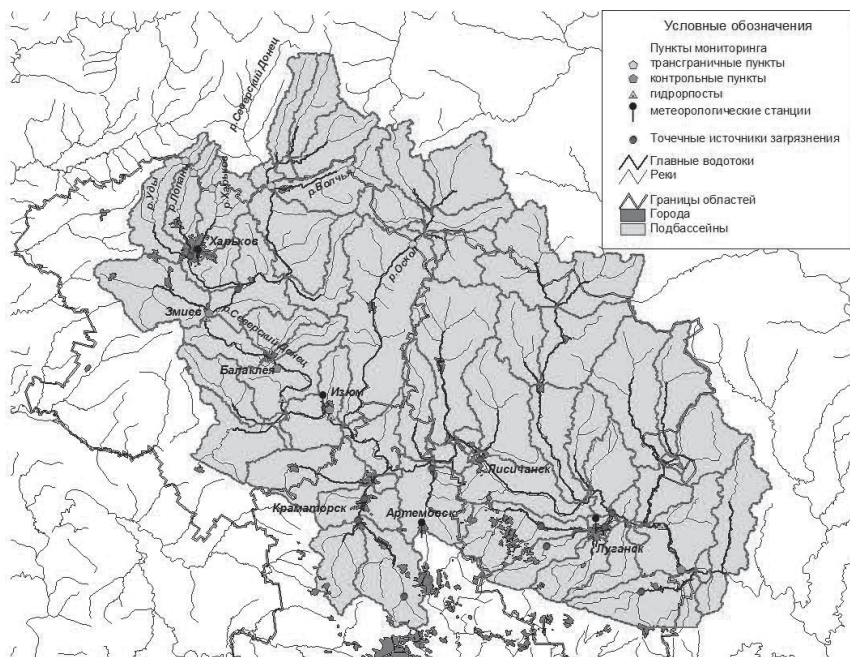
- обобщенный показатель качества воды, разработанный УкрНИИЭП [5];
- суммарный объем сточных вод.

При SWAT-моделировании предполагается, что каждому подбассейну соответствует не более одного точечного источника загрязнения. Поэтому все точечные источники загрязнения, расположенные в пределах данного подбассейна, заменялись одним эффективным источником загрязнения. Расход возвратных вод для эффективного источника загрязнения принимался равным сумме расходов возвратных вод всех точечных источников загрязнения, расположенных в данном подбассейне, а годовая масса сброса каждого из рассматриваемых загрязняющих веществ принималась равной суммарной годовой массе сброса данного вещества с возвратными водами всех точечных источников загрязнения данного подбассейна. Расположение эффективного источника загрязнения устанавливалось на главном водотоке соответствующего подбассейна. Всего при SWAT-моделировании было рассмотрено 13 эффективных источников загрязнения, расположение которых представлено на карте (рис. 1).

Поскольку SWAT-моделирование предусматривает оценку трех консервативных веществ, для выполнения расчетов были выбраны три металла, которые наиболее часто встречаются в возвратных водах различных промышленных и коммунальных предприятий, отводящих возвратные воды в бассейне р. Северский Донец: общее железо, хром<sup>6+</sup> и цинк.

Кроме поступления металлов в поверхностные воды с возвратными водами точечных источников загрязнения, при моделировании учитывалось также поступление металлов вследствие трансграничного переноса загрязняющих веществ речными водами. Для этих целей были проанализированы данные наблюдений за качеством речных вод в шести трансграничных пунктах мониторинга. Все трансграничные створы расположены на границе с Российской Федерацией. Для оценки массовых расходов трансграничного переноса загрязняющих веществ с речными водами были также использованы данные наблюдений за расходами речных вод на гидрологических постах, ближайших к трансграничным пунктам мониторинга. Расположение трансграничных пунктов мониторинга и ближайших гидрологических постов представлено на карте (рис. 1).

Необходимость учета при моделировании трансграничного переноса обусловлена относительно высокими концентрациями загряз-



**Рис. 1. Границы подбассейнов, расположение точечных источников загрязнения и пунктов мониторинга**

няющих веществ в трансграничных створах. Данные о концентрациях металлов в трансграничных створах рек по данным наблюдений за 2009 г. приведены в табл. 1.

Как видно из приведенных в табл. 1 данных, среднегодовые значения показателей по общему железу и хрому шестивалентному превышали принятые в Украине рыбохозяйственные нормы (ПДК = 0,1 мг/дм<sup>3</sup> и 0,001 мг/дм<sup>3</sup> соответственно) во всех трансграничных пунктах мониторинга. Среднегодовые концентрации цинка незначительно превышали рыбохозяйственные нормативы (1.2 ПДК) в трансграничных створах на двух реках: Оскол и Харьков.

*1. Концентрации металлов в трансграничных створах рек Харьковской обл. по результатам наблюдений за 2009 г.*

№ п/п	Пункт мониторинга	Средняя концентрация, мг/дм <sup>3</sup>			Минимальная концентрация, мг/дм <sup>3</sup>			Максимальная концентрация, мг/дм <sup>3</sup>		
		Fe	Cr <sup>6+</sup>	Zn	Fe	Cr <sup>6+</sup>	Zn	Fe	Cr <sup>6+</sup>	Zn
1	р. Оскол, с. Тополи	0,115	0,002	0,012	0,05	0,002	0,01	0,15	0,002	0,013
2	р. Северский Донец, с. Огурцово	0,11	0,002	0,008	0,05	0,001	0,003	0,15	0,003	0,014
3	р. Волчья, с. Землянки	0,12	0,0018	0,007	0,06	0,001	0,003	0,16	0,002	0,01
4	р. Харьков, пгт Стрелечья	0,16	0,003	0,012	0,15	0,002	0,008	0,19	0,004	0,014
5	р. Лопань, пгт Казачья Лопань	0,20	0,0027	0,010	0,16	0,002	0,006	0,28	0,003	0,012
6	р. Уды, с. Окоп	0,29	0,0027	0,006	0,23	0,002	0	0,38	0,003	0,009

На территории бассейна р. Северский Донец были выбраны четыре станции мониторинга погодных условий — в городах Харьков, Изюм, Артемовск и Луганск. Для каждой станции были сформированы таблицы статистических характеристик необходимых для моделирования метеорологических параметров.

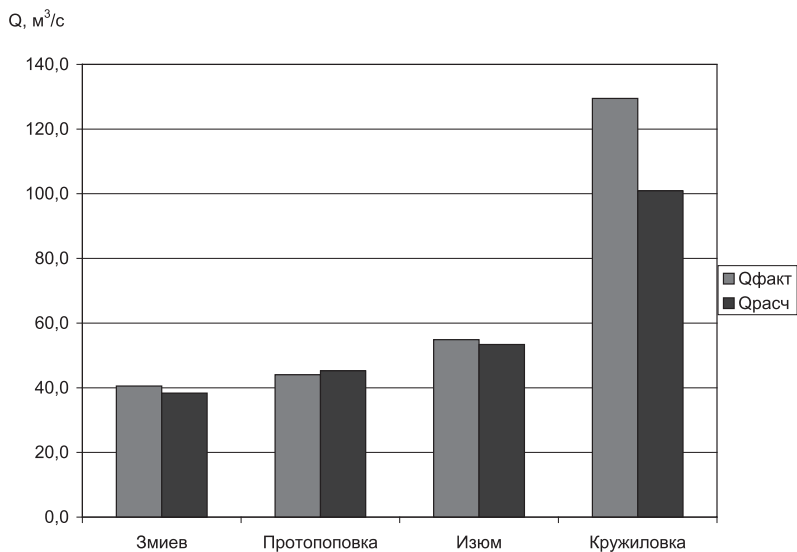
Все подготовленные таблицы данных были импортированы в базу данных приложения ArcSWAT, затем было проведено SWAT-моделирование для периода 01.01.2009 г. – 31.12.2009 г. В результате проведенного моделирования были рассчитаны среднегодовые расходы речных вод для устьевых створов всех подбассейнов.

Калибровка модели проводилась с помощью программ SWAT-CUP2 [6]. Использовался метод ParaSol. Для проведения калибровки была сформирована таблица с данными о фактических расходах речных вод и концентрациях загрязняющих веществ в пунктах мониторинга.

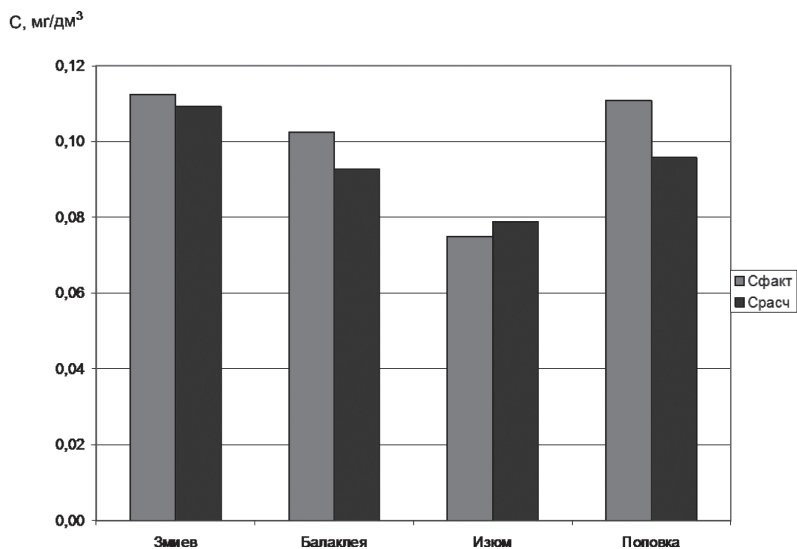
Калибровка проводилась по одному показателю — расход воды в реке. Данный показатель сравнивался с наблюдаемыми значениями расхода речных вод на четырех гидрологических постах: г. Змиев, с. Протопоповка (ниже г. Балаклея), г. Изюм и с. Кружиловка (граница с Россией, см. рис. 1). В условиях Украины существенное влияние на формирование речного стока оказывают процессы снеготаяния. Поэтому при проведении калибровки дополнительно к 10-ти параметрам, которые оптимизируются в программе SWAT-CUP2 по умолчанию, в список оптимизируемых показателей были включены также шесть параметров, характеризующих процессы снеготаяния.

Результаты сопоставления расчетных значений расходов речных вод (после калибровки модели) с наблюдаемыми расходами представлены на рис. 2.

Как видно из приведенной на рис. 2 диаграммы, как для фактических, так и для расчетных расходов речных вод наблюдается возрастание значений расходов от гидропоста г. Змиев к гидропосту с. Кружиловка. Как следует из данных, приведенных на рис. 2, максимальная относительная ошибка оценки расходов речных вод (22,1 %) наблюдалась для гидропоста с. Кружиловка. Для остальных гидропостов относительная ошибка изменялась в пределах 2,7...5,3 %.



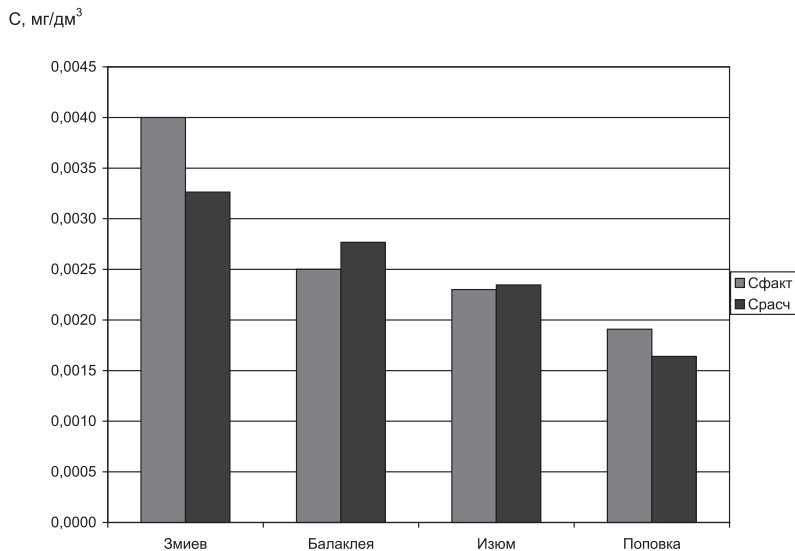
**Рис. 2. Сопоставление расчетных и наблюдаемых расходов речных вод по данным за 2010 г.**



**Рис. 3. Расчетные и наблюдаемые среднегодовые значения концентраций общего железа в пунктах мониторинга на р. Северский Донец**

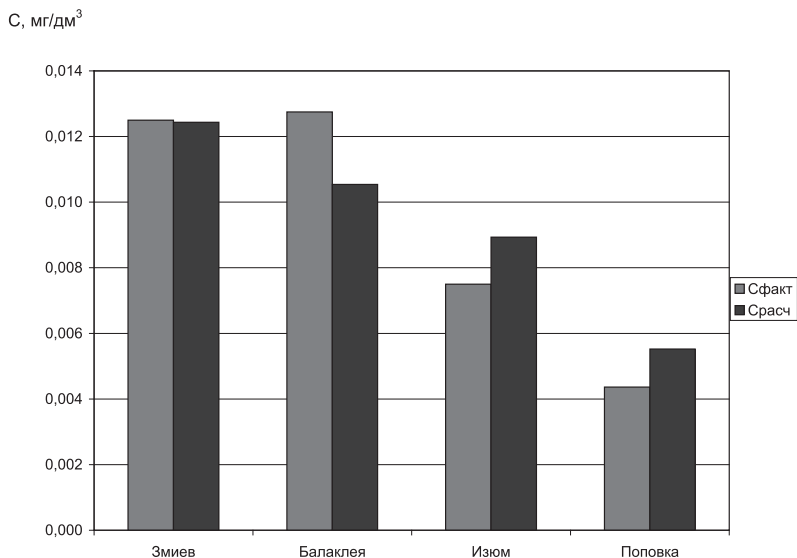
Модельные расчеты концентраций общего железа, шестивалентного хрома и цинка выполнялись для четырех пунктов мониторинга, расположенных на реке Северский Донец: г. Змиев (ниже города), с. Красная Гусаровка (ниже г. Балаклея), с. Синичное (ниже г. Изюм) и с. Поповка (граница с Российской Федерацией). В пунктах ниже городов Змиев и Изюм имеются также гидрологические посты, где измеряется расход речной воды. Для пунктов с. Красная Гусаровка (ниже г. Балаклея) и с. Поповка (граница с Российской Федерацией) были использованы данные о расходах воды на гидрологических постах, расположенных в непосредственной близости от них: с. Протопоповка (ниже г. Балаклея) и с. Кружиловка (граница с Российской Федерацией, см. рис. 1).

Как видно из диаграмм, приведенных на рис. 3 – рис. 5, имеет место удовлетворительное соответствие между расчетными и наблюдаемыми среднегодовыми концентрациями металлов в рассматриваемых четырех пунктах мониторинга. Динамика пространственного изменения расчетных концентраций для всех рассматриваемых металлов совпадает с динамикой пространственного изменения



**Рис. 4.** Расчетные и наблюдаемые среднегодовые значения концентраций хрома шестивалентного в пунктах мониторинга на р. Северский Донец





**Рис. 5. Расчетные и наблюдаемые среднегодовые значения концентраций цинка в пунктах мониторинга на р. Северский Донец**

наблюдаемых концентраций. Максимальные относительные ошибки оценки концентраций для всех металлов наблюдались в пункте мониторинга с. Поповка (граница с Российской Федерацией). Вероятно, это обусловлено наибольшей ошибкой оценки расхода сточных вод в данном створе наблюдений. Из трех рассматриваемых металлов относительная погрешность оценки является наибольшей для цинка. Средние по пунктам мониторинга относительные погрешности составляют: для общего железа — (–5,3%), для шестивалентного хрома — (–5%) и для цинка — 7%.

## Выводы

Геоинформационная система ArcGIS с расширением ArcSWAT (модель SWAT) может быть использована для моделирования процессов формирования речного стока и загрязнения речных вод бассейна р. Северский Донец.

Использование для калибровки модели SWAT программы SWAT-CUP при дополнительной оптимизации параметров, описывающих

процессы снеготаяния, позволило получить хорошее соответствие между расчетными и наблюдаемыми значениями расходов речных вод.

Повторные модельные расчеты после калибровки модели позволили получить хорошее соответствие между расчетными и наблюдаемыми значениями концентраций металлов в пунктах мониторинга качества речных вод.

Проведенные исследования свидетельствуют о возможности использования SWAT-моделирования для прогнозирования расходов и качества воды в различных створах украинской части бассейна р. Северский Донец при различных нагрузках загрязняющих веществ от точечных источников загрязнения поверхностных вод и при различных метеорологических условиях, в том числе связанных с изменением климата.

1. ArcSWAT 2.0 interface for SWAT2005 / User's guide / M. Winchell, R. Srinivasan, M. di Luzio, J. Arnold // Texas. April. 2010. — 489 p.
2. Modeling blue and green water resources availability in Iran / M. Faramarzi, K. C. Abbaspour, R. Schulin, H. Yang // Hydrological Processes. — Vol. 23. — P. 486-501.
3. Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources / C. Santi, J. G. Arnold, J. R. Williams, W. A. Dugas, R. Srinivasan, L. M. Hauck / Journal of the American water resources association. Vol. 37. — № 5. — 2001. — P. 1169-1188.
4. Макаровский Е. Л. Методы комплексного оценивания в информационном обеспечении управления экологической безопасностью региона / Е. Л. Макаровский // Восточно-Европейский журнал передовых технологий, 2006, № 3/3 (21), с. 94-99.
5. Karim C. Abbaspour. SWAT-CUP2. SWAT Calibration and Uncertainty Programs. Version 2. A User Manual / Karim C. Abbaspour. — Switzerland, 2008. — 95 pp.

### **Брук В. В., Кресін В. С., Макаровський Є. Л. ГІС-МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЗАБРУДНЕННЯ РІЧКОВИХ ВОД МЕТАЛАМИ**

*У роботі досліджено можливості застосування геоінформаційної системи (ГІС) при моделюванні забруднення річкових вод у кліматичних умовах України для басейну річки з великою площею, що характеризується високою щільністю населення і високим рівнем розвитку промисловості. В якості району досліджень був обраний басейн р. Сіверський Донець*

(українська частина). Дослідження виконувалися в рамках проекту 7-ї Рамкової програми ЄС EnviroGrids.

**Ключові слова:** геоінформаційна система, моделювання процесів забруднення річкових вод, SWAT-моделювання, витрата річкової води.

## **Brooke V. V., Kresin V. S., Makarovskiy E. L. GIS MODELING OF RIVER WATER METALS POLLUTION**

*We studied the possibility of using a geographic information system (GIS) for modeling of river water pollution in the climatic conditions of Ukraine for the river basin with a large area characterized by high population density and a high level of industrial development. As the study area was chosen Seversky Donets Basin (Ukrainian part). Studies have been performed in the framework of the 7th Framework Programme EnviroGrids.*

**Keywords:** geographic information system, modeling of river water pollution, SWAT- simulation flow of river water.