

Представлена програма ArcSWAT, яка дозволяє оцінювати стан ґрунтів і вод на заданій території за допомогою геоінформаційної системи ArcGIS. SWAT-моделювання враховує закономірності усіх основних процесів кругооберту води в природі. Отримана модель призначена для вирішення великого кола задач охорони вод і управління водними ресурсами

Ключові слова: комп'ютерне моделювання, кругооберт води в природі, забруднюючі речовини, гідрологія, гідроінформатика

Представлена программа ArcSWAT, которая позволяет оценивать состояние почв и вод на заданной территории с помощью геоинформационной системы ArcGIS. SWAT-моделирование учитывает закономерности всех основных процессов круговорота воды в природе. Полученная модель служит для решения большого круга задач охраны вод и управления водными ресурсами

Ключевые слова: компьютерное моделирование, круговорот воды в природе, загрязняющие вещества, гидрология, гидроинформатика

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ РЕКИ СЕВЕРСКИЙ ДОНЕЦ С ПОМОЩЬЮ ГИС-ТЕХНОЛОГИИ ARCSWAT

В. П. Белогуров

Кандидат технических наук, доцент*

E-mail: v.belogurov@gmail.com

А. В. Тюрин*

*Кафедра ГИС, оценки земель

и недвижимого имущества

Харьковский национальный университет

городского хозяйства им. А. Н. Бекетова

ул. Революции, 12, г. Харьков, Украина, 61002

1. Введение

Термин «гидроинформатика» был введен профессором Эбботом (М. В. Abbott) в 1992 году для обозначения средств интеграции вычислительной гидравлики и искусственного интеллекта. В настоящее время к гидроинформатике относятся моделирующие и информационные системы для управления водными ресурсами, в том числе в областях: в сельском хозяйстве, экологической гидрологии и инженерной гидравлики.

Гидроинформатика охватывает широкий круг современных инструментов моделирования водных систем, вопросов изменения климата, интеграцию метеорологических и гидрологических моделей, вычислительного интеллекта, нейронные сети и нечеткие системы управления в реальном времени, многокритериальной оптимизации и систем поддержки принятия решений, высокого уровня компьютерных и геоинформационных технологий (ГИС-технологий).

Данная работа направлена на поиск и анализ ГИС-технологий, пригодных для решения задач экологической гидрологии на основе моделирования процессов круговорота воды в природе в рамках актуальной «Межрегиональной программы по охране и использованию вод бассейна реки Северский Донец».

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Известна ГИС-технология ArcHydro [1], которая позволяет разрабатывать специальные модели и подго-

тавливать данные для решения ряда задач гидрологии и инженерной гидравлики с помощью программных систем HEC-RAS и HEC-HMS производства фирмы Dodson (USA) [2]. Однако, данный подход не позволяет моделировать фундаментальные процессы наземной части гидрологического цикла.

Поиск ГИС-технологий для решения широкого круга задач гидрологии целесообразно вести, прежде всего, среди программных продуктов экологической гидрологии. Наиболее полный список моделирующих систем и инструментов для этого предлагает продвинутая учебная программа The Erasmus Mundus Joint Master program, которую реализует группа университетов Европы. В обзорный список [3] входит более 20 программных продуктов: MIKE-11, 21, SHE, Sobek 1D and 2D, Delft 3D, MODFLOW, BreZo, HEC-HMS, HEC-RAS, SWAT, EPANET, MOUSE, HBV, SWMM, WEST, Aquarius, Neural Network Machine, AFUZZY, LINGO, Globe and NSGAX Optimizers, mDSS5, ArcGIS, Access, Google Earth, и др.

Среди программ списка [3] только SWAT (Soil and Water Assessment Tools – инструментарий оценивания почвы и вод) позволяет учитывать обе фазы гидрологического цикла: наземную и русловую. Эта программа базируется на математическом моделировании фундаментальных процессов круговорота воды в природе, что позволяет, аргументировано управлять мероприятиями по рациональному использованию и использованию вод.

Другим областью применения гидроинформатики является управление водными ресурсами в сельском хозяйстве. Среди программных продуктов сельскохозяйственного назначения представляют интерес:

AgroGIS Web service и Pixel Solutions. Первый из них содержит в себе такие возможности, как мониторинг состояния техники, создание и редактирование ГИС-карт, оперативное управление распаеванными землями, накопления и отображения агрохимических показателей почвы [4]; второй – контроль использования земель сельскохозяйственного назначения, автоматическое определение состояния культур в фазах роста и развития, выявление полей, имеющих отклонения от норм развития с их оценкой и систематизацией, определение динамики наземной биомассы основных сельскохозяйственных культур, прогнозирование урожайности [5].

Именно этот модуль позволил создать эффективную постоянно действующую модель определения фоновых концентраций, необходимых для нормирования сброса загрязняющих веществ [3].

Среди всех перечисленных программных продуктов только SWAT (Soil and Water Assessment Tools – инструментальный оценивания почвы и вод) позволяет учитывать обе фазы гидрологического цикла: наземную и русловую. Именно ему и связанной с ним программе ArcSWAT будет посвящено последующее изложение.

Целью работы является анализ пригодности ГИС-технологии ArcSWAT для решения проблем рационального использования и охраны вод в бассейнах рек.

Для этого необходимо решить три задачи:

1. Выполнить теоретический анализ базовых основ SWAT-моделирования;
2. Провести вычислительные эксперименты на SWAT-модели реки Северский Донец;
3. Проанализировать пригодность ГИС-технологии ArcSWAT оценивания экологической эффективности мероприятий, предусмотренных в «Межрегиональной программе по охране и использованию вод бассейна реки Северский Донец».

3. Анализ возможностей SWAT-моделирования

Теоретические основы SWAT – моделирования приведены в работе [6]. Базой для SWAT-моделирования является некоторая заданная водосборная территория (общий водосбор, бассейн), которую для повышения точности следует разделить на ряд частных водосборов (суббассейнов).

Использование суббассейнов в моделировании особенно выгодно, когда различные области общего водосбора отличаются видом землепользования, имеют достаточно разнообразные почвы или гидрологические характеристики. В пределах каждой зоны или гидрологического района реки имеют общие черты водного режима, обусловленные общностью условий формирования стока. К их числу относятся: рельеф бассейна, геологическое строение, степень лесистости, озерность и заболоченность.

Независимо от того, какой тип проблемы изучается с помощью SWAT, водный баланс является движущей силой всего, что происходит на водосборной территории. Моделирование гидрологического цикла может быть разделено на два основных раздела. Первым разделом является наземная часть круговорота воды в природе, который показан на рис. 1. Наземная часть

круговорота воды в природе регулирует количество воды, донные отложения, питательные вещества и пестицидные нагрузки на основное русло в каждом суббассейне. Второй раздел – это трансформация речного стока, который можно определить как движение воды, транспорт наносов, биогенных элементов, загрязняющих веществ и т. п. через речную сеть водосбора к выходу.

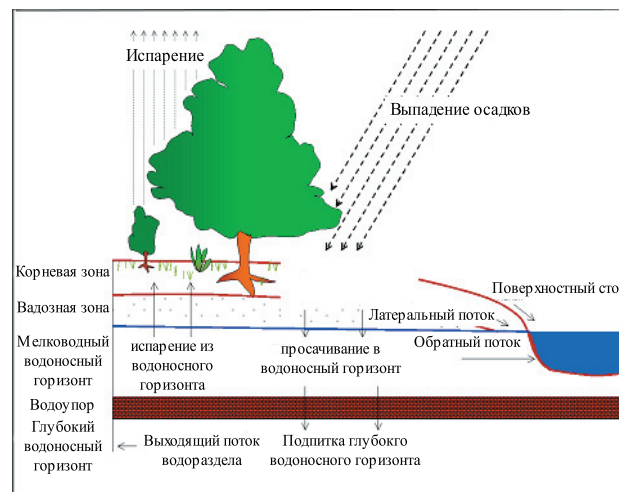


Рис. 1. Схематическое изображение гидрологического цикла [6]

SWAT-моделирование базируется на уравнении водного баланса:

$$SW_1 = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{\text{day}} - Q_{\text{surf}} - E_a - w_{\text{seep}} - Q_{\text{gw}}), \quad (1)$$

где SW_1 – конечное содержание грунтовых вод (мм H_2O); SW_0 – начальное содержание грунтовых вод в день (мм H_2O); t – время (дни); R_{day} – количество осадков в день (мм H_2O); Q_{surf} – количество поверхностного стока в день (мм H_2O); E_a – количество эвапотранспирации в день (мм H_2O); w_{seep} – количество воды, которая просачивается в вадозную зону (зону аэрации) через почвогрунты в день (мм H_2O); Q_{gw} – количество обратного потока в день (мм H_2O).

Закономерности формирования компонентов водного баланса, входящих в уравнение (1), приведены в работах [8–10].

Общая последовательность процессов, используемых при SWAT моделировании наземной части круговорота воды в природе, приведена на рис. 2.

Поверхностный сток прогнозируется отдельно для каждого суббассейна и объединяется для получения общего стока на всей водосборной территории.

4. Вычислительные эксперименты

SWAT – это имитационная почвенно-гидрологическая оценочная масштабируемая модель бассейна реки. Экспериментальный вариант модели был разработан для Северского Донца с целью проверки возможности применения SWAT-моделирования для решения некоторых задач охраны вод (рис. 3).

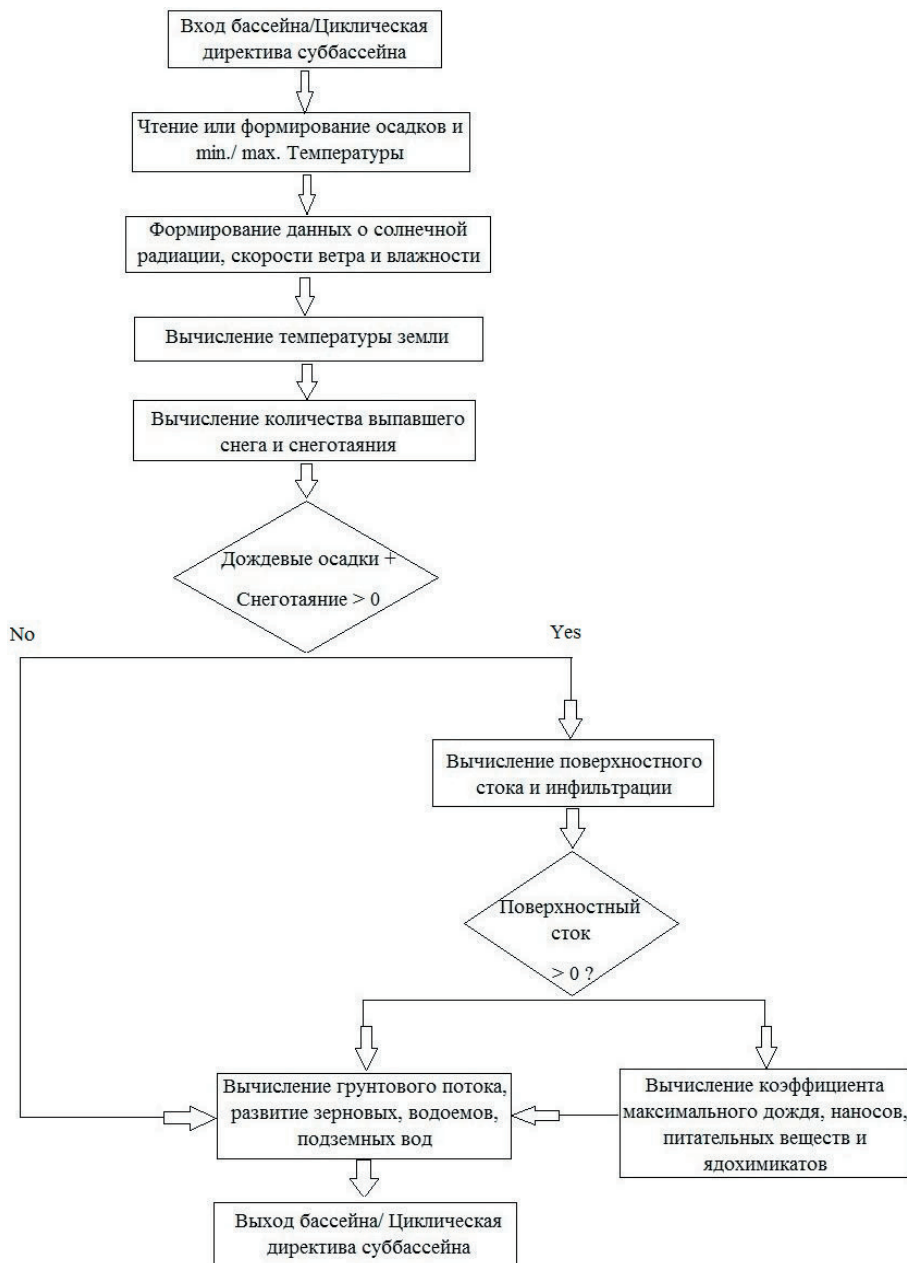


Рис. 2. Алгоритм формирования процессов в суббассейне



Рис. 3. Фрагмент выделения суббассейнов на общем водосборе бассейна реки Северский Донец для Харьковской области

SWAT-модель – это постоянно работающая модель с временным интервалом равным 24 часа. Она физически обоснована, эффективна и оптимальна с точки зрения математики и компьютерных технологий, опирается на существующие распространённые типы ГИС – технологии на базе ArcGIS, технологически ориентирована на постоянную работу в длительном режиме моделирования и имитации ситуаций на длительные прогнозные сроки.

Для того чтобы моделирование реки имело достаточно высокую точность, следует располагать данными о речном стоке и его зависимости от осадков на протяжении длительного периода наблюдений. Эти данные соотносятся с текущими показателями, такими как уровень воды в водохранилищах, уровни грунтовых вод, степень насыщенности водой водоносных горизонтов.

Данные метеорологических радиолокационных станций об осадках и общие методы прогнозирования очень важны для предсказания наступающих наводнений. В районах, где имеются данные многолетних наблюдений, интенсивность и высота наводнений может быть предсказана с очень хорошей точностью и на достаточно продолжительный период времени. Служба прогнозирования наводнений обычно предоставляет сведения о максимально ожидаемом уровне воде и примерном

времени её наступления для наиболее важных мест вдоль участка реки. Также могут вычисляться ожидаемые периоды повторяемости наводнений.

Река является элементом ландшафта и ее режим отражает влияние всего комплекса физико-географических и климатических факторов, свойственных данной природной зоне.

Среди них главная роль принадлежит осадкам и их распределению в году, режиму температуры воздуха, испарению и инфильтрации.

Основой для изучения гидрологического режима рек являются непрерывные в течение длительного времени наблюдения сети гидрологических станций и постов, размещенных на них. Использование результатов этих наблюдений и их научное обобщение дают возможность определять и прогнозировать состояние основных характеристик рек.

Результаты наблюдений за уровнями позволяют установить зоны и продолжительность затопления отдельных участков речной долины, скорость продвижения паводочной волны вдоль по реке (в том случае, если на реке имеется не менее двух водомерных постов) и сделать выводы об общем характере изменения водности реки в течение года и в более долгие периоды. Имеется возможность также получить информацию о наиболее высоких половодьях и других многолетних характеристиках.

Данная модель может использоваться для решения целого ряда задач: прогнозирования последствий антропогенного воздействия сельскохозяйственного производства на гидрологический и почвенный компонент ландшафта, на донные отложения, на миграцию пестицидов и продуктов их распада, на урожайность сельскохозяйственных культур, геохимический фон исследуемого региона.

К основным компонентам модели относятся следующие характеристики: метеорологические и климатические параметры, гидрологические характеристики бассейнов, температурные и другие физические и химические характеристики почвенного покрова и другие.

Были проведены вычислительные эксперименты на SWAT-модели бассейна р. Северский Донец по определению содержания в воде загрязняющих веществ из двух групп: металлы и минерализация. Фрагмент таблицы расчетов приведен на рис. 4.

l#1	metal#2	metal#3	concent.sim	concent.obs
IE+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
IE+03	0.00E+00	5.67E+04	1.62E-02	1.70E-02
IE+03	0.00E+00	5.67E+04	1.39E-02	1.47E-02
IE+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
IE+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
IE+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
IE+03	0.00E+00	5.67E+04	1.27E-02	1.34E-02
IE+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
IE+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
IE+03	4.38E+00	5.71E+04	1.10E-02	1.16E-02
IE+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
IE+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
IE+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
IE+03	4.38E+00	5.94E+04	6.95E-03	7.21E-03
IE+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
IE+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
IE+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
IE+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
IE+03	4.38E+00	5.94E+04	7.47E-03	7.55E-03
IE+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
IE+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
IE+02	1.17E+02	3.68E+03	2.72E-03	2.91E-03
IE+03	4.38E+00	5.71E+04	7.78E-03	7.89E-03
IE+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
IE+02	1.17E+02	3.68E+03	2.73E-03	2.81E-03
IE+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
IE+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00

Рис. 4. Фрагмент результирующего файла с атрибутивными данными

В двух последних столбцах рис. 4 представлены концентрации загрязняющих веществ, измеренные фактически (concent.obs) и рассчитанные по модели (concent.sim). Поскольку их значения достаточно близки друг к другу то можно считать, что результаты вычислительных экспериментов подтверждают возможность использования данной модели для оценки качества воды.

В результате экспериментов установлено, что корректное формирование и тщательная калибровка SWAT-модели дает возможность использовать ГИС-технологии ArcSWAT для оценивания качества воды реки Северский Донец по этим показателям.

5. Выводы

1. По результатам анализа широкого круга программ гидроинформатики, установлено, что ГИС-технология ArcSWAT в настоящее время является единственным способом моделирования всех основных процессов круговорота воды в природе для обеих фаз гидрологического цикла (наземной и русловой).
2. Показано, что SWAT-моделирование позволяет аргументированно определять средства управления водными ресурсами в бассейне реки, поскольку оно базируется на классическом математическом описании фундаментальных компонентов водного баланса.
3. Вычислительные эксперименты подтвердили пригодность ГИС-технологии ArcSWAT для оценивания концентрации загрязняющих веществ и решения задач охраны вод.
4. Представленная модель рекомендуется как базовое средство для оценивания экологической эффективности мероприятий, предусмотренных в трансграничной «Межрегиональной экологической программе по охране и использованию вод бассейна реки Северский Донец».

Литература

1. ArcHydro: GIS for Water Resources [Text] / David R. Maidment, editor. – ESRI Press, Redlands, California, 2002– 210 с.
2. Hydro-CD by Dodson. Over 60 Storm Water Programs. 4th Edition. 1998. – Dodson & Associates, Inc. – 1 CD-R.- Hydro-CD interface Windows*3.1 or higher.
3. The Erasmus Mundus Programme in Flood Risk Management [Electronic resource]. – Available at: <http://www.floodriskmaster.org>.
4. HYDROInform Ltd. [Electronic resource]. – Available at: <http://www.hydroinform.hu/Index.html>
5. Білогуров, В. П. Моделювання фонової якості води для розрахунків нормативів скиду [Текст] / В. П. Білогуров, Г. А. Нагорна // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – Т. 2, № 6 (50). – С. 46–49.
6. Agriculture management [Electronic resource]. – Available at: <http://www.sintalagro.com.ua>.
7. Agriculture GIS web-server [Electronic resource]. – Available at: <http://www.pixel solution.com.ua>.
8. Walski, T. M. Computer Applications in Hydraulic Engineering. Connecting Theory to Practice. Fifty Edition [Text] / T. M. Walski, T. E. Barnard, S.R. Durrans, M. E. Meadows – 2002, Haestad Methods, Inc., 2002. – 375 с.
9. Neitsch, S. L. Soil and Water Assessment Tool. Theoretical Documentation. Version 2009 [Text] / S. L. Neitsch, J. G. Arnold, J. R. Kiniry, J. R. Williams Grassland – 2011, Texas A&M Univ. Press, College Station, 2011. – 647 с.
10. Brown, L. C. & Barnwell T.O. The enhanced water quality models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS documentation and user manual. (1987). - EPA document, EPA/600/3-87/007. USEPA, Athens, GA, 280.