

УДК 502.2/519.8(075.8)

## SWAT – МОДЕЛИРОВАНИЕ: ВОЗМОЖНОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В КРЫМУ

*Лычак А.И., Бобра Т.В., Яшенков В.О.*

*Таврический национальный университет им. В.И.Вернадского, Симферополь, Украина*

В статье рассматривается краткая история разработки симулятора возможных состояний бассейновой системы - SWAT. Проанализированы некоторые возможности в области прогнозного моделирования данной моделью, приводятся примеры реализации модели в Крымском регионе.

**Ключевые слова:** моделирование, прогнозирование, SWAT, гидрологические модели, ГИС, оценка

Задача прогнозного моделирования геоэкологических ситуаций требует разработки и внедрения новых интегрированных систем динамического моделирования. Наиболее разработанной и апробированной в настоящее время системой комплексного прогнозного моделирования является симулятор возможных состояний бассейновой системы – **SWAT(Soil and Water Assessment Tool)**.

**История развития SWAT** детально описана в технической документации к данной модели, а так же во множестве публикаций посвященных проблемам имитационного моделирования состояния водных ресурсов [1].

SWAT – имитационная почвенно-гидрологическая оценочная масштабируемая модель бассейна (группы суббассейнов) реки. Она была разработана для определения и оценки влияния хозяйственной деятельности человека на большие и сложные бассейновые структуры, на состояние водных ресурсов. Данная модель разрабатывалась на протяжении более чем тридцати лет Службой сельскохозяйственных исследований (ARS - *Agricultural Research Service*) Департамента сельского хозяйства США (USDA).

В настоящее время SWAT-модель получила признание во всем мире как наиболее эффективный и научно-обоснованный инструмент описания, прогноза и оценки состояния почвенной и гидрологической составляющей в состоянии современных ландшафтных бассейновых систем. Этот факт нашел свое отражение в десятках публикаций в наиболее рейтинговых научных изданиях, сотнях конференций, более 300 статей в американских и европейских журналах. Исторически SWAT базируется на более ранних моделях, разработанных USDA-ARS (Служба сельскохозяйственных исследований Департамента сельского хозяйства США). Таких моделей было несколько:

1) CREAMS - модель оценки влияния сельскохозяйственного производства на геохимию почв, сток, эрозию, подземные воды и другие компоненты сельскохозяйственных ландшафтов (CREAMS - Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems) [2, 3];

2) GLEAMS – модель, описывающая влияние сельскохозяйственного производства на подземные воды (GLEAMS - the Groundwater Loading Effects on Agricultural Management Systems) [4, 5];

3) EPIC – модель Environmental Impact Policy Climate [6], характеризующая влияние климата на состояние окружающей среды (сокращение EPIC произошло от первоначального названия этой модели Erosion Productivity Impact Calculator (Williams, 1990)).

Модель SWAT является прямым потомком модели SWRRB - симулятора состояния водных ресурсов в районах сельскохозяйственного использования (SWRRB - Simulator for Water Resources in Rural Basins) [7].

Разработка симулятора состояния водных ресурсов началась еще в 80-х годах прошлого века, с модификации модели CREAMS, и, в частности, одного из его сегментов - симулятора осадков и ежедневного стока. Значительной трансформации подверглись подмодели и сегменты модели GLEAMS, рассчитывающие и симулирующие поверхностный сток. При этом площадь охвата увеличилась от одного до десятка и более бассейнов. Был разработан модуль расчет суммарного стока на выходе бассейна. Другие улучшения коснулись модулей расчета скоростей стока, расчета его пиковых значений, усовершенствованы модули расчета подземного стока, динамики уровня воды в водохранилищах [8]. В модели EPIC были трансформированы расчетные модули роста сельскохозяйственных культур, переноса и осаждения взвешенных частиц, генератор погодных условий.

Интеграция в модели SWRRB отдельных модулей из трех исходных моделей позволил создать совершенно новый инструмент динамического и прогнозного моделирования состояния и оценки качества водного компонента в бассейновых ландшафтных комплексах и решения широкого круга экологических проблем, связанных с сельскохозяйственным производством.

В 1995 году с появлением модуля (ROTO) - маршрутизатора водных потоков [8] - модель SWRRB получила дальнейшее развитие. С появлением этого модуля были частично сняты ограничения на размеры площадей и количество модельных бассейнов. Теперь количество бассейнов могло превышать 10, но при этом значительно возросли требования к вычислительной мощности компьютеров, что продолжало накладывать определенные технологические ограничения на использование данной модели. Для преодоления этой технологической трудности модуль (ROTO) был объединен на программном уровне с моделью SWRRB, в результате чего появилась первая SWAT- модель.

SWAT модель включила в себя все самые ценные свойства предыдущих моделей и особенно имитационные и симулирующие алгоритмы модели SWRRB. Это сделало ее исключительно мощным инструментом расчета и прогноза состояний водного компонента в ландшафте. Начиная с 1995 года и до настоящего времени, SWAT-модель постоянно улучшается и пополняется новыми модулями. Информацию и техническую документацию обо всех модификациях модели можно найти на сайте Техасского научного центра Blackland Research and Extension Center (BREC). Собственно компьютерную программу модели можно бесплатно получить на официальном сайте SWAT [9, 10, 11, 12].

## ОБЩИЙ ОБЗОР МОДЕЛИ

Что же такое SWAT модель? Прежде всего, это имитационная модель, симулирующая значения выходных параметров в зависимости от заданных на входе переменных, характеризующих различные воздействия на почвенно-гидрологическую систему в рамках модельных бассейнов или суббассейнов.

Это постоянно работающая модель с временным интервалом осреднения равным 24 часам (сутки). Она физически обоснована, эффективна и оптимальна с точки зрения математики и компьютерных технологий, опирается на существующие распространенные типы ГИС-технологий, в частности, полностью совместима с ArcGIS, технологически ориентирована на постоянную работу в длительном режиме моделирования и симуляции ситуаций на длительные прогнозные сроки.

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

К основным компонентам модели SWAT относятся следующие характеристики: метеорологические и климатические параметры, гидрологические характеристики бассейнов, температурные и другие физические и химические характеристики почвенного покрова, параметры роста растений и урожайности, параметры наличия питательных веществ в почвах, пестицидов, бактерий и болезнетворных микроорганизмов, характеристика землепользования района.

Модель SWAT делит модельную территорию на бассейны (рис.1) и на более мелкие суббассейны (рис.2.), а те в свою очередь на элементарные операционные единицы называемые в данной модели гидрологически реагируемые единицы (HRUs - hydrologic response units) (рис.3).

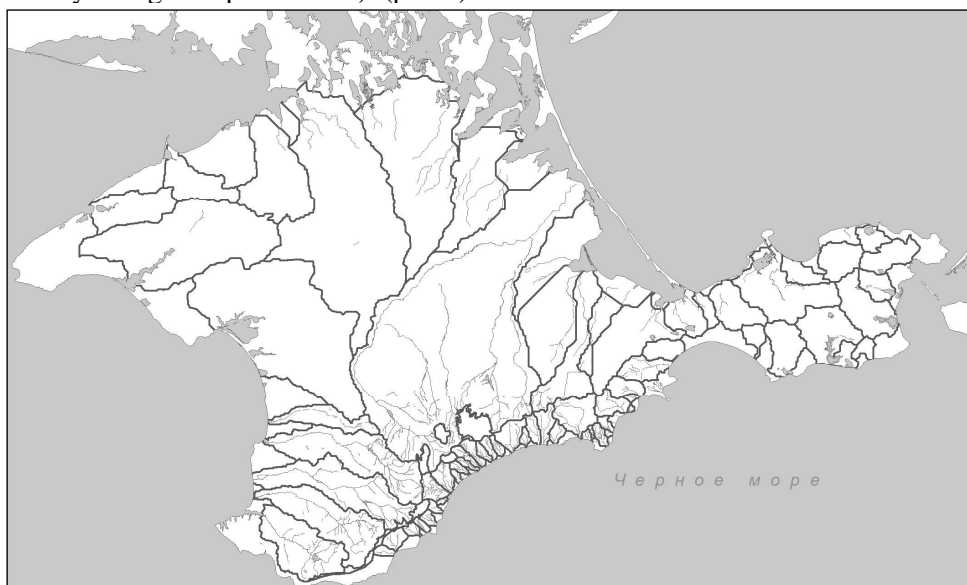


Рис. 1. Бассейновая структура Крыма

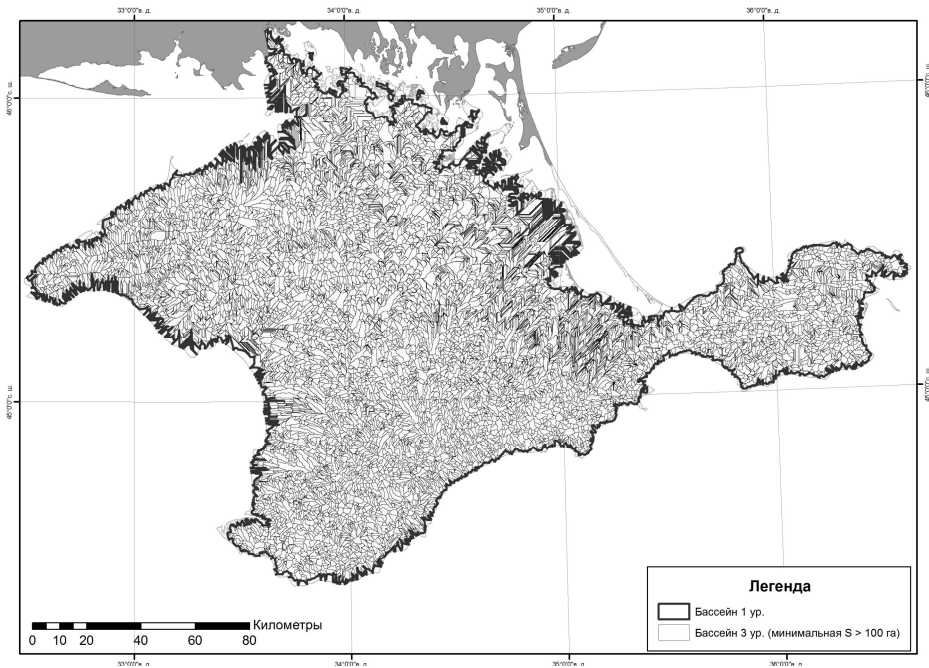


Рис.2. Рассчитанная SWAT карта суббассейнов Крыма

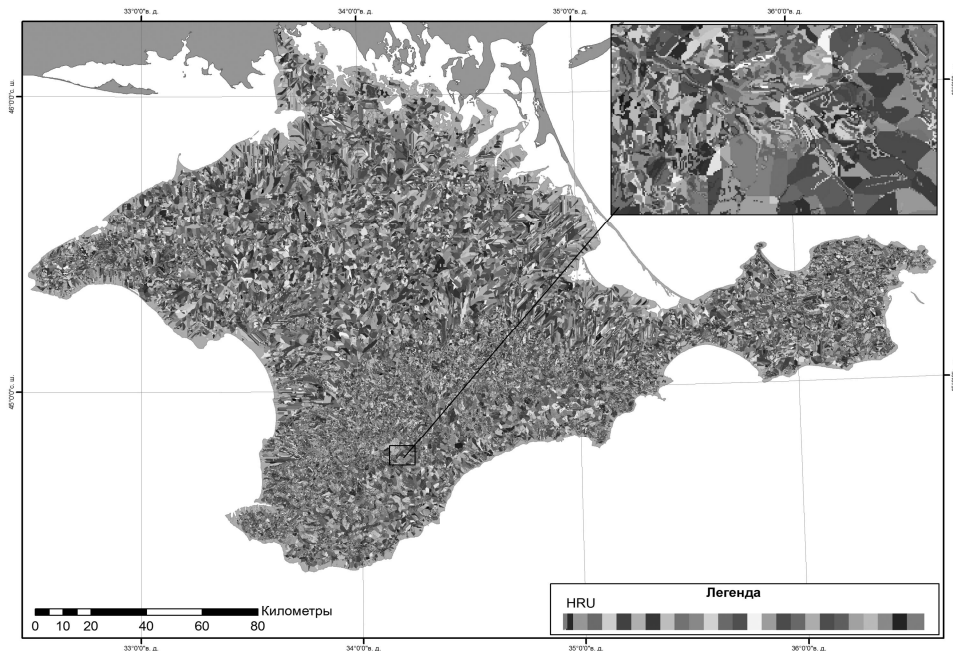


Рис. 3. Рассчитанная SWAT карта элементарных гидрологических единиц (HRUs - hydrologic response units)

Элементарные гидрологические единицы (HRUs) характеризуются внутренней однородностью почвенного покрова, элементов рельефа, типа землепользования или растительного покрова. В первом приближении они соответствуют ландшафтными фациям или простым урочищам в рамках ландшафтной бассейновой структуры. Интеграция элементарных гидрологических единиц в более крупные системы - суббассейны, в модели SWAT осуществляется довольно механистически, путем определения доминирующего по площади HRUs и присвоения его значения-индекса и характеристик всему суббассейну.

Климатические данные необходимые для запуска модели включают в себя суточные значения осадков, влажности, средняя, максимальная и минимальная температуры, скорости и направления ветра, значения солнечной радиации и др. В Европе и Соединенных Штатах Америки данные в модель заводятся ежедневно, непосредственно с работающих гидрометеорологических станций, постов наблюдений и материалов дистанционного зондирования Земли. В Крыму и Украине данные возможно заводить с некоторым опозданием из получаемых баз данных.

В случаях, когда имеются данные об эвапотранспирации, загрузка данных о влажности воздуха не требуется. Средняя температура воздуха используется в случаях когда симулируется выпадение осадков в виде снега. Максимальные и минимальные температуры используются в расчетах температуры почвенного покрова и вод.

Входные климатические данные могут генерироваться на основании расчета таблицы состоящей из 13 ежемесячных климатических переменных, которые вытекают из долгосрочных измерений параметров погоды.

Специфические варианты ввода климатических данных включают: предварительное выделение высотных уровней (рис.4) для расчета орографических осадков или таяния снега, предварительную корректировку климатических данных на входе для моделирования изменения климата и прогнозирование его последствий, и предварительное прогнозирование будущих погодных условий, которые будут использоваться в качестве входных значений, для прогноза ситуаций.

Общий гидрологический баланс рассчитывается для каждой элементарной гидрологической единицы HRUs. Рассчитываются и моделируются области перехвата осадков и стока талых вод, области инфильтрации на орошаемых территориях, перераспределение воды в почвенных горизонтах, испарение, латеральный поток грунтовых вод в почвенных горизонтах и обратный поток из мелких водоносных горизонтов. Оценивается ареал покрытия снегом, температуры и интенсивность таяния снега. Для гидрологического прогноза используются классические проверенные временем методики расчета принятые в Соединенных Штатах Америки и Европе.

Технологии маршрутизации потоков используются для расчета перераспределения стока, как в плане, так и в разрезе почвенных горизонтов. В SWAT модели имеется опция расчета верховодки, что важно в районах близкого залегания грунтовых вод например в крымском Присивашье.

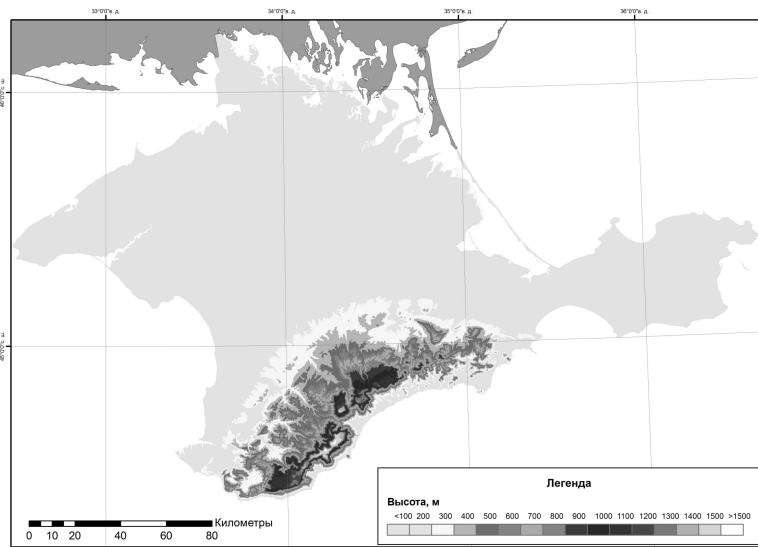


Рис.4. Карта высотных уровней для расчета и моделирования орографических осадков и метелевого переноса снега

Модель позволяет осуществлять расчет урожайности и биопродуктивности сельскохозяйственных и естественных угодий в зависимости от уровней загрязнения окружающей среды. Расчет осуществляется для различных операционных единиц: севообороты, типы угодий, естественные лесонасаждения и так далее. Но во всех этих случаях в основе расчетов лежат гидрологические единицы HRUs.

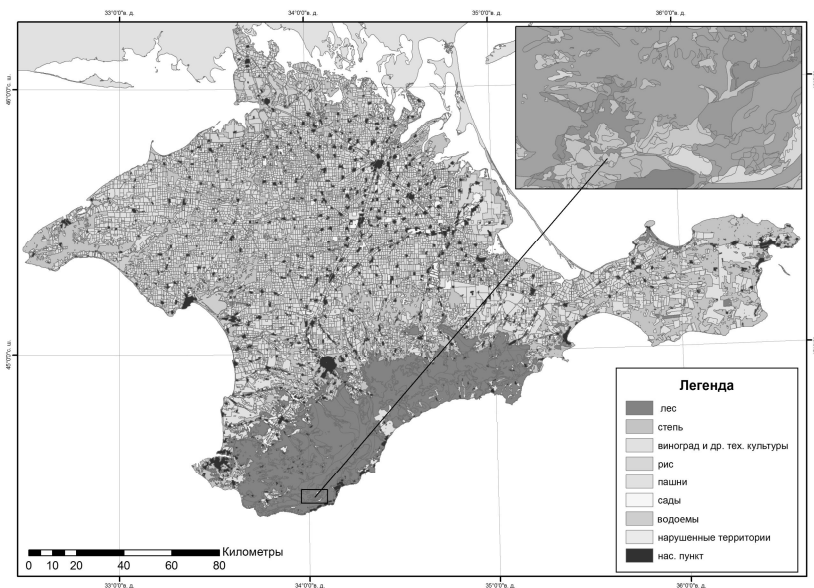


Рис.5. Карта землепользования Крыма. На врезке показаны цветом прогнозируемые фазы вегетации лесов горного Крыма

Заложенные в модели расчетные алгоритмы позволяют моделировать биопродуктивность сельскохозяйственных угодий и лесов на различных фазах их развития от саженцев до зрелого состояния. Посадка, сбор урожая, обработка почвы, внесение питательных веществ в почву и применение пестицидов может быть смоделировано для каждой системы земледелия с конкретной или прогнозируемой датой начала сева. Имеется возможность расчета количества поступления навоза в результате выпаса скота.

Последствия выбранной практики использования и охраны водных и почвенных ресурсов моделируются в SWAT путем учета типа землепользования, агротехнологий, контурности земледелия, лесозащитных насаждений, наличия дренажных систем. Особое место отводится пространственной структуре почвенного покрова. Большинство исходных показателей зависит от типов, видов и разновидностей почвенного покрова (рис.6). Особое внимание уделяется моделированию гидромелиоративных решений и их следствий. В основе всех этих расчетов лежит концепция расчета и оценки жизненного цикла мелиоративных мероприятий.

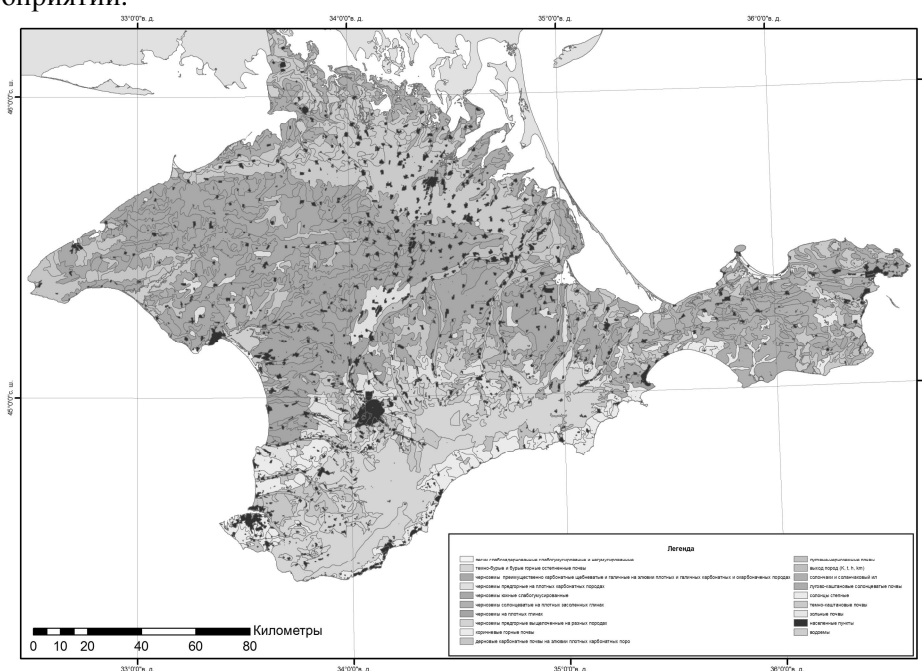


Рис.6. Цифровая модель почвенного покрова Крыма для целей SWAT – моделирования

На уровне отдельных HRUs и в масштабе русла реки SWAT позволяет рассчитать и смоделировать распространение загрязнений, твердый осадок, наличие бактерий и болезнетворных микроорганизмов. Перенос и переотложение пылеватых частиц почвенного покрова рассчитывается с помощью модифицированного уравнения потери почвы (Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE)).

Движение азота и фосфора в HRUs моделируется в зависимости от циклов подпитки, путем учета внесения ряда неорганических и органических удобрений.

Потери азота и фосфора из почвенной системы рассчитывается в модели путем учета их поглощения произрастающими культурами или выносом их поверхностным стоком как в виде растворов или твердых частиц. Рассчитывается также вклад бактерий в круговорот азота и фосфора.

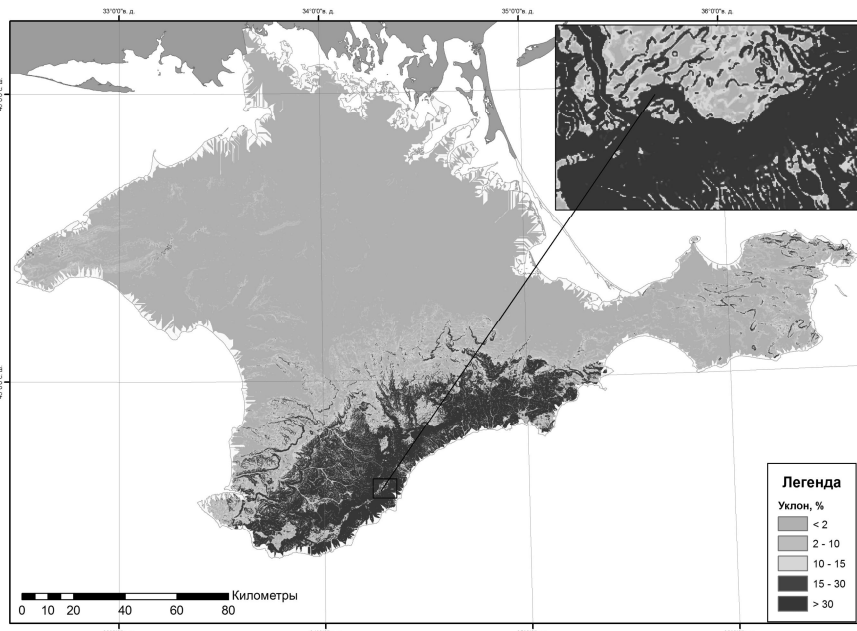


Рис. 7. Расчетная модель крутизны склонов

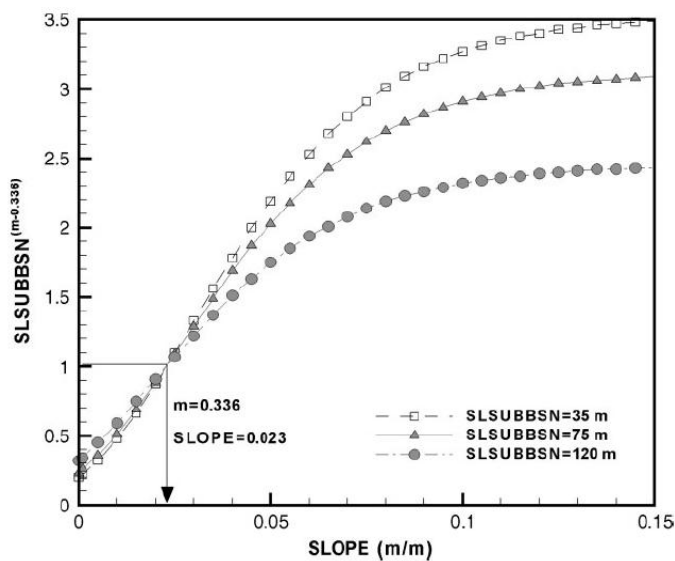


Рис.8. Расчет влияния длины и крутизны склонов на вынос твердых частиц в результате эрозии почв

Таблица 1.

Сегмент таблицы с рассчитанными прогнозными (P) и реальными (N) значениями группы параметров, характеризующих интенсивность поверхностного стока, выполненных SWAT

Parameter	Stream Flow	Sediment	Total P	Total N	Pesticide
<i>ALPHA_BF</i>	0.03	0.25	0.21	0.21	<b>0.35</b>
<i>BIOMIX</i>	-0.03	0.07	0.09	0.07	0.06
<i>CH_COV</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<i>CH_K1</i>	-0.01	-0.01	-0.01	0.00	0.00
<i>CH_K2</i>	-0.01	-0.16	-0.12	-0.12	-0.14
<i>CH_N1</i>	0.00	-0.08	-0.12	-0.09	0.00
<i>CH_N2</i>	-0.01	<b>-0.75</b>	-0.14	-0.13	-0.19
<i>CH_S1</i>	0.00	0.10	0.13	0.08	-0.01
<i>CH_S2</i>	0.00	0.20	0.04	0.03	0.04
<i>CMN</i>	0.02	0.03	0.04	0.11	0.00
<i>CN</i>	<b>2.39</b>	<b>4.28</b>	<b>4.16</b>	<b>3.26</b>	<b>6.78</b>
<i>DAY_CORN</i>	0.00	0.00	0.01	0.03	<b>0.45</b>
<i>DAY_SOYB</i>	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
<i>DAY_WWHT</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<i>DDRAIN</i>	<b>0.15</b>	0.20	0.37	0.32	0.35
<i>ESCO</i>	<b>0.27</b>	0.20	0.22	0.35	<b>0.68</b>
<i>FILTERW</i>	0.00	0.30	<b>0.74</b>	<b>0.60</b>	<b>0.60</b>
<i>GW_DELAY</i>	-0.04	0.00	0.00	-0.08	-0.01
<i>GW_REVAP</i>	-0.07	0.00	0.00	-0.09	0.00

Важнейшим требованием к использованию SWAT-моделей является установление их чувствительности и верификация. Практически во всех случаях, наблюдается расхождение между прогнозируемыми и реальными значениями (рис. 8, табл.1). SWAT обладает мощным и достаточным инструментарием калибровки моделей, повышения их точности и чувствительности.

## ВЫВОД

Развитие и внедрение SWAT-моделей в Крыму и Украине, позволит более эффективно использовать имеющиеся данные и технологический инструментарий для более эффективного построения прогнозных моделей и оценок результатов взаимодействия общества и природы. Развитие этого инструментария осуществляется на основе ГИС-технологий, материалов дистанционного зондирования, GPS-технологий, интернет технологий и технологий экологического мониторинга. Требования к базам исходных данных и формат данных генерируемых и симулируемых моделью соответствует международным стандартам и директиве ЕС INSPIRO. Это с одной стороны, облегчает доступ к международным базам данных, материалам ДЗЗ, технологиям расчета и моделирования, но с другой стороны требует перестройки уже существующей в Украине системы сбора экологической информации.

## Список литературы

1. Gassman P. W. The Soil and Water Assessment Tool: Historical Development, Application, and Future Research Direction. SWAT. American Society of Agricultural and Biological Engineers / Gassman P. W., M. R. Reyes, C. H. Green, J. G. Arnold. Vol. 50(4): - 2007.- 1211-1250 pp.
2. Knisel, W.G. (Editor). 1980. CREAMS: A field-scale model for Chemical, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems. US Department of Agriculture, Science and Education Administration, Conservation, Report No. 26.643pp.
3. Knisel, W.G., R.A. Leonard, and F.M. Davis. 1994 The GLEAMS model plant nutrient component. PART I: model documentation. USDA. ARS, Coastal Plain Experiment Station. Southeast Watershed Research Laboratory. Tifton, Georgia, 31793. 57pp.
4. Leonard, R.A., W.G. Knisel, and D.A. Still. 1987. GLEAMS: Groundwater Loading Effects of Agricultural Management Systems. Trans. Amer. Soc. of Agric. Engrs. 30: 1403-1418 pp.
5. Knisel, W.G., F.M. Davis, and R.A. Leonard. 1994 GLEAMS version 2.0 Part III: User Manual. USDA-ARS, Coastal Plain Experiment Station. Southeast Watershed Research Laboratory. Tifton, Georgia, 31793. 200pp.
6. Izaurralde, R. C., J. R. Williams, W. B. McGill, N. J. Rosenberg, and M.C. Quiroga Jakas. 2006. Simulating soil C dynamics with EPIC: Model description and testing against long-term data. Ecol. Model. 192(3-4): 362-384 pp.
7. Arnold. J.G., J.R. Williams. 1987. Validation of SWRRB: Simulator for water resources in rural basins. J. Water Resour. Plan. Manage. ASCE 113(2): 243-256 pp.
8. Arnold. J.G., J.R. Williams and D.R. Maidment. 1995b. Continuous-time water and sediment-routing model for large basins. J. Hydrol. Eng. ASCE 121(2): 171-183 pp.
9. SWAT. 2007b. Soil and Water Assessment Tool: AVSWAT. College Station, Tex.: Texas A&M University. Available at. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [www.brc.tamus.edu/swat/avswat.html](http://www.brc.tamus.edu/swat/avswat.html). Accessed 13 February 2007.
10. SWAT. 2007d. Soil and Water Assessment Tool: SWAT model. College Station, Texas: Tex. A&M University. Available at. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [www.brc.tamus.edu/swat/soft\\_model.html](http://www.brc.tamus.edu/swat/soft_model.html). Accessed 21 February 2007.
11. SWAT. 2007d. Soil and Water Assessment Tool: Peer-reviewed literature. College Station, Texas A&M University. Available at. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [www.brc.tamus.edu/swat/pubs\\_peerreview.html](http://www.brc.tamus.edu/swat/pubs_peerreview.html). Accessed 17 February 2007.
12. SWAT. 2007a. Soil and Water Assessment Tool: ArcSWAT. College Station, Tex.: Texas A&M University. Available at. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [www.brc.tamus.edu/swat/arcswat.html](http://www.brc.tamus.edu/swat/arcswat.html). Accessed 20 February 2007.

**Личак О.І. SWAT - моделювання: можливості і перспективи використання в Криму / Личак О.І., Бобра Т.В., Яшенков В.О. // Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Географія. – 2011. – Т.24 (63). – № 2, ч. 2 – С. 34-43.**

У статті розглядається коротка історія розробки симулятора можливих станів басейнової системи - SWAT. Проаналізовано деякі можливості в області прогнозного моделювання даною моделлю, наводяться приклади реалізації моделі в Кримському регіоні.

**Ключові слова:** моделювання, прогнозування, SWAT, гідрологічні моделі, ГІС, оцінка

**Lychak AI. SWAT - simulation: opportunities and prospects in Crimea / Lychak AI, T. Beaver, Yashenkov V.O. // Scientific Notes of Taurida National V. I. Vernadsky University. – Series: Geography. – 2011. – Vol. 24 (63). – № 2, p. 2 – P. 34-43.**

The article discusses a brief history of the development of simulation of possible states of the basin system - SWAT. Analyzed some possibilities for predictive modeling of the model, provides examples of implementation of the model in the Crimean region.

**Keywords:** modeling, forecasting, SWAT, hydrological models, GIS, assessment

*Поступила в редакцію 08.04.2011 г.*