

Сборник докладов международной научной  
конференции памяти выдающегося русского  
гидролога Юрия Борисовича Виноградова

ТРЕТЬИ ВИНОГРАДОВСКИЕ ЧТЕНИЯ

## **ГРАНИ ГИДРОЛОГИИ**

*Под редакцией к.т.н. О.М. Макарьевой*

Санкт-Петербургский государственный университет

Россия

28-31 марта 2018

**Международная конференция памяти выдающегося  
русского гидролога Ю.Б. Виноградова  
ТРЕТЬИ ВИНОГРАДОВСКИЕ ЧТЕНИЯ «ГРАНИ ГИДРОЛОГИИ»**

Организаторы Кафедра гидрологии суши, Институт наук о  
Земле, Санкт-Петербургский государственный  
университет

Научная Группа модели Гидрограф

Председатель д.г.н., профессор В.В. Дмитриев,  
Программного комитета Институт наук о Земле, Санкт-Петербургский  
государственный университет

Председатель к.т.н. О.М. Макарьева,  
Организационного Научная группа модели Гидрограф,  
комитета Институт наук о Земле, Санкт-Петербургский  
государственный университет

Спонсоры ООО «НПО «Гидротехпроект»,  
Санкт-Петербург

АНО НИЦ «Геодинамика»  
Южно-Сахалинск

Российский Фонд Фундаментальных  
Исследований

## Моделирование стока малой равнинной реки (на примере р. Велеса в бассейне Западной Двины)

**Казачук А.А., Терский П.Н.**

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

*[alenaishappy@ya.ru](mailto:alenaishappy@ya.ru)*

**Аннотация:** В данной работе рассматривается проблема расчета речного стока для водосбора малой реки Велесы. Для решения этой проблемы используется модель SWAT, разработанная службой сельскохозяйственных исследований министерства сельского хозяйства США. Проведена калибровка, верификация модели, выявлены чувствительные параметры, а также смоделированы среднемесячные гидрографы стока для р. Велесы с целью продления рядов расходов воды на периоды, когда наблюдения отсутствуют.

**Ключевые слова:** гидрологическое моделирование, речной сток, Велеса, SWAT, калибровка параметров, чувствительность и неоднозначность модели

### **Введение**

Объект исследования – малая река Велеса (площадь бассейна 1420 км<sup>2</sup>) представляет собой характерный по условиям формирования стока водоток верхней части трансграничного бассейна р. Западной Двины. Велеса протекает по равнинной заболоченной территории Тверской области и впадает в Западную Двину. Водный режим освещен слабо, вблизи устья действует гидрологический пост Рудня (площадь водосбора 890 км<sup>2</sup>), период наблюдений непродолжительный – 1989-2006 гг.

В современной гидрологии постоянно возрастают требования к качеству и детальности расчетных характеристик речного стока, которые являются ключами к воднобалансовым расчетам, оценке транспорта взвешенных наносов и загрязняющих веществ. Наиболее перспективное развитие расчетов и прогнозов речного стока связано с использованием математического моделирования, которое опирается на геоинформационные технологии пространственного анализа данных о подстилающей поверхности, толще почвогрунтов и распределения метеорологической информации по территории. Гидрологические модели успешно применяются и в нашей стране, однако их применение направлено в основном на большие реки, и в меньшей степени на малые, в частности из-за дефицита исходных данных. Кроме того, это связано с тем, что гидрологические прогнозы строятся на регрессионных зависимостях и эмпирических подходах (Руководство, 1989), обобщаемых для больших водосборов, но индивидуальных для каждого малого водосбора. В настоящее время физическая обоснованность современных гидрологических моделей позволяет отойти от регрессионных зависимостей, использовать большие объемы гидрометеорологической информации на основе статистических и численных методов.

Один из немногих способов восстановления рядов речного стока – гидрологическое моделирование. Главной целью данной работы являлось моделирование среднемесячных гидрографов стока для р. Велесы для продления рядов расходов воды на периоды, когда наблюдения отсутствуют.

### **Материалы и методы**

Процессы формирования стока, а также формулировка подходов к его моделированию были описаны Р.Хортоном в 1945 г (Horton, 1945) и развиты К.Бивеном в многочисленных публикациях (Beven, Kirkby, 1979). Глубоким анализом стокоформирующих факторов в нашей стране впервые занялись такие ученые, как

Алексеев Г.А. и Великанов М.А., в 1940-50 гг. Результаты их исследований определили основу первой модели формирования дождевого стока, созданной в 1963 г. Р.К. Линслеем.

По мере развития методов обработки гидрометеорологической информации и вычислительных мощностей появилась возможность успешно работать с детерминированными моделями с распределенными параметрами, а также интенсивно развивать динамико-стохастические (Гельфан, Демидов, Мотовилов). В настоящее время наиболее известный российский программный комплекс моделирования формирования речного стока – ЕСОМАГ (Мотовилов, 2004). Успешно применяется комплекс «Гидрограф» (Виноградов и др., 2010), модель формирования паводочного стока на Дальнем Востоке (Гарцман, 2008) и другие. Сегодня, в практике моделирования стока рек стали широко использоваться современные средства пространственного представления поверхности водосборов и информационного обеспечения моделей (Интернет, ГИС, результаты дистанционного зондирования Земли), что привело к образованию новых моделирующих структур - интегрированных информационно-моделирующих систем (ИИМС). Они включают в себя: пространственно распределенные гидрологические модели и их программное обеспечение, базы различных данных и системы управления ими, географические информационные системы, зачастую имеют серверное исполнение, например, американская ИИМС "HAWQS" (<https://epahawqs.tamu.edu/>).

Выбор гидрологической модели основывается на задачах, пространственно-временном масштабе изучаемых процессов, на ожидаемых результатах ее применения, а также на возможности использовать те или иные исходные данные. В целях данной работы требуется модель открытого использования, обладающая математической основой, пригодной для малого водосбора, в которой в то же время заложен комплекс средств расчета стока наносов и биогенных элементов, обладающая высокой чувствительностью к информации о водосборе. Среди мировых продуктов такими свойствами обладает гидрологическая модель SWAT (Soil and Water Assessment Tool), разработанная службой сельскохозяйственных исследований министерства сельского хозяйства США, прошедшая многоуровневую проверку состоятельности в сфере гидрологии, сельского хозяйства, городской гидрологии и др. (Gassman et al., 2007). В настоящее время модель широко применяется в 32 странах мира. Преимуществами модели SWAT по сравнению с другими моделями является наличие обширной и качественной документации, отсутствие ограничений по площади водосбора, совместимость с современными ГИС-пакетами (ArcGIS, QGIS, MapWindow), наличие внешней программы автокалибровки SWAT-CUP (Abasspour et al., 2015), находящейся в открытом доступе, а также наличие открытой электронной библиотеки тематических публикаций и профессионального онлайн-сообщества.

Процесс моделирования различных видов стока (воды, растворенных веществ, взвешенных наносов) основан на расчете формирования речного стока и его параметризации. Моделирование стока с помощью модели SWAT проходит в несколько этапов.

В первую очередь необходимо создать модель водосбора. В данной работе это было реализовано с помощью программного комплекса ArcSWAT с использованием следующих исходных данных:

1. Цифровая модель рельефа ALOS PALSAR RTC разрешением 12,5 метров, созданная в рамках программы Alaska Satellite Facility Геофизическим институтом Аляскинского университета в Фэрбенксе. Данная модель представлена в открытом доступе в удобном для ГИС формате GeoTiff.
2. Растровый слой почв мира HWSOILS (fao.org/soils-portal/soil-survey/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v12/en) разрешением примерно 1 км, а также база данных со всеми физическими характеристиками разных слоев,

полученная из MAPWINDOW GIS ([mapwindow.org](http://mapwindow.org)), которая подготовлена Швейцарским водным центром ([eawag.ch/en](http://eawag.ch/en)) на основе данных FAO-HWSD.

### 3. Растровый слой ландшафтов и землепользования GlobeLand30 разрешением 30 метров, созданный Национальным центром геоматики Китая ([globallandcover.com](http://globallandcover.com))

Следующим важным шагом является подготовка базы метеорологических данных. В модели SWAT реализуется посуточный шаг расчета водного баланса водосбора и учитываются основные процессы водообмена поверхности водосбора с атмосферой, почвенными и подземными водами, русловыми и нерусловыми водотоками, растительным покровом. Часть исходных данных (ежедневные максимальная и минимальная температуры воздуха, осадки и относительная влажность) представляет собой результат наблюдений и ежедневных осреднений по метеостанциям, полученный из следующих источников:

- ВНИИГМИ-МЦД ([meteo.ru](http://meteo.ru))
- базы данных NOAA и ECAD ([data.nodc.noaa.gov](http://data.nodc.noaa.gov), [www.ecad.eu](http://www.ecad.eu))

Скорость ветра и суммарная солнечная радиация наблюдаются далеко не на всех станциях, поэтому использованы данные реанализа ERA-Interim (<https://www.ecmwf.int>). Реанализ используется также для заполнения пропусков в рядах других величин.

Для подготовки гидрологических данных проводился анализ многолетних колебаний стока на посту Рудня, в результате которого был выявлен период малой водности с 1960 по 1987 гг., а также многоводный период с 1987 года и до конца наблюдений. Полученные в результате анализа периоды водности обусловили выбор рядов наблюдения за расходами воды для работы модели, непрерывный ряд наблюдений имеется в период 1989-2000 гг., в том числе: 1989-1992 – warm-up период (период «разогрева»), 1992-1996 – период калибровки, 1996-2000 – период верификации модели среднемесячного стока.

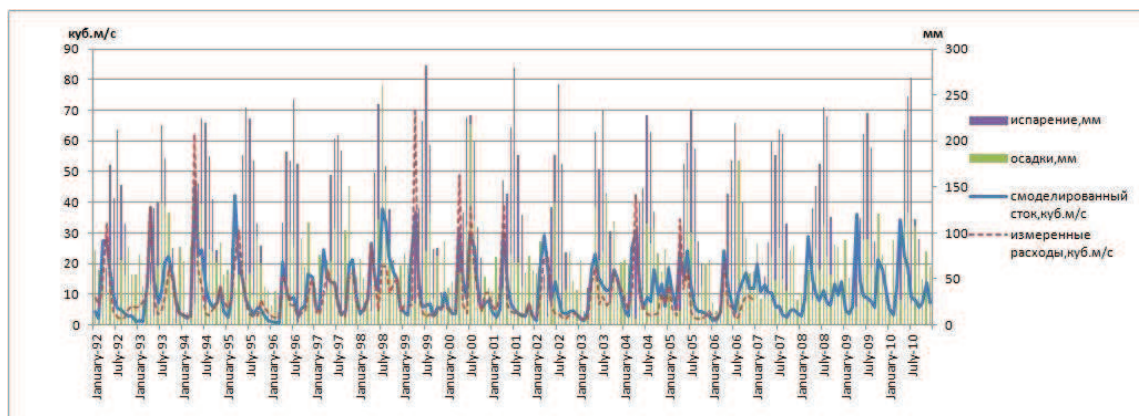
В модели SWAT расчет водного стока опирается на 33 основных параметра. Перечень чувствительных параметров зависит от генетических особенностей речного стока, размера бассейна и временного шага реализации модели (ежедневного, месячного или годового), а также от выбора подхода – распределенного или сосредоточенного (для распределенных параметров). Калибровка параметров возможна вручную, но в данной работе оценка чувствительности и калибровка параметров реализована на основе статистических методов с помощью специального ПО SWAT CUP (Abbaspour et al., 2007)

#### Результаты

Калибровка и верификация позволили адаптировать модель SWAT для водосбора с талым стоком, где преобладающую роль в формировании стока играют снежные параметры.

В результате калибровки каждого параметра по одному было выявлено 15 параметров, чувствительных к изменениям среднемесячного стока (табл.1). Дальнейшая калибровка модели с применением только чувствительных параметров привела к очень хорошим результатам (критерий Нэша-Сатклиффа составил 0,81). При использовании полученных в результате калибровки интервалов изменения чувствительных параметров для периода верификации были получены хорошие значения критерия Нэша-Сатклиффа(0,74) и среднеквадратической ошибки(-0,2).

Полученные при калибровке и верификации значения чувствительных параметров были подставлены в модель SWAT, в результате чего удалось рассчитать компоненты водного баланса со среднемесячным шагом, а также восстановить ряды стока за период отсутствия наблюдений до 2010 года (рис.1).



**Рис. 1 Совмещенный график измеренных расходов воды, смоделированных расходов, осадков и испарения**

**Табл. 1 – Результаты калибровки чувствительных параметров модели р. Велесы для среднемесячного шага расчета водного стока**

№	Наименование параметра	Описание	Диапазон значений	Вычисление среднемесячного стока
1	CN2_FRST	Номер кривой связи «сток-осадки» для леса	35-98	86-94
2	CN2_HAY,URLD,RNGB,RNGE	Номер кривой связи «сток-осадки» для территории без леса (луга,пастбища,территории под антропогенным воздействием, территории, занятые водой)	35-98	93-102
3	GW_DELAY	Запаздывание грунтовых вод (дни)	0-500	0.34
4	GWQMN	Минимальная глубина залегания воды в первом водоносном горизонте, при которой возможен водообмен с поверхностью (мм)	0-5000	927
5	GW_REVAP	Коэффициент испарения почвы	0,02-2	0.03
6	RCHRG_DP	Доля фильтрации в глубокий водоносный горизонт	0-1	0.43
7	SOL_AWC	Свободная влага почвы, мм Н <sub>2</sub> O/мм почвы	0-1	0-0,175
8	SOL_K	Коэффициент фильтрации, мм/ч	0-2000	15,2-30,5
9	CH_L2	Длина основного канала, км	-0,05-500	131
10	HRU_SLP	Средняя крутизна склона	0-1	0.08
11	SFTMP	Температура воздуха, ниже которой выпадают осадки только в виде снега, °С	-20-20	3.55
12	SMTMP	Температура начала снеготаяния, °С	-20-20	1.08
13	SNOCVMX	Минимальное содержание воды в снеге, соответствующее 100% снежному покрову	0-500	16.2
14	SNO50COV	Доля воды в снеге от момента начала схода снега, соответствующее 50% снежному покрову	0-1	0.72
15	CN_FROZ	Коэффициент фильтрации для промерзшей почвы	0,0001 - 0,9	0.87

**Выводы**

- 1) адаптирована модель SWAT для малого водосбора р. Велесы с преобладанием талого стока с использованием стратегии последовательной калибровке генетически различных групп параметров;
- 2) выявлены 15 чувствительных параметров, модель откалибрована с хорошим результатом (критерий Нэша-Сатклиффа составил 0.81 при калибровке и 0,74 при верификации);
- 3) рассчитано испарение в бассейне р.Велесы со среднемесячным шагом;
- 4) восстановлены ряды стока р.Велесы на посту Рудня за период отсутствия наблюдений (2006-2010 гг.).

*Список литературы:*

- Виноградов Ю.Б., Виноградова Т.А. Математическое моделирование в гидрологии. М.: Академия, 2010. 320 с.
- Гарцман Б.И. Дождевые наводнения на реках юга Дальнего Востока: методы расчетов, прогнозов, оценок риска. Владивосток: Дальнаука, 2008. 223 с.
- Мотовилов Ю.Г. Информационно-моделирующий комплекс ECOMAG для моделирования речных бассейнов // VI Всероссийский гидрологический съезд: тезисы докл. – СПб, 2004, с. 139.
- Открытый ресурс "30-meter GlobalLand cover data product", 2014. [Электронный ресурс], доступ по ссылке <http://www.globallandcover.com/> [18.07.2017]
- Официальный сайт ФГБУ "ВНИИГМИ-МЦД". [Электронный ресурс], доступ по ссылке [meteo.ru](http://meteo.ru) [10.02.2017]
- Руководство по гидрологическим прогнозам. Выпуск 1. Долгосрочные прогнозы элементов водного режима рек и водохранилищ. – Л.: ГМИ, 1989. – 358 с.
- Abbaspour K.C., Rouholahnejad E., Vaghefi S., Yang R.,H., Kløve B.. A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model // Journal of Hydrology. Volume 524, May 2015, Pages 733-752
- Abbaspour K.C., Vejdani M., Haghightat S. SWAT-CUP calibration and uncertainty programs for SWAT. Proc. Intl. Congress on Modelling and Simulation (MODSIM'07). 2007. P. 1603–1609.
- Beven K.J., Kirkby M.J. A physically based variable contributing area model of basin hydrology // Hydrol. Sci. Bull. 1979. Vol 24(1). P 43-69.
- Carbon Dioxide Information Analysis Center <http://cdiac.ess-dive.lbl.gov/>
- Dataset: JAXA/METI ALOS-1 PALSAR RTC. Accessed through ASF DAAC, [Электронный ресурс], доступ по ссылке <https://www.asf.alaska.edu> [15.08.2017]
- Gassman P., Reyes M., Green C., Arnold J. (2007), The Soil and Water Assessment Tool: Historical Development, Applications, and Future Research Directions // Transactions of the ASABE, vol. 50, issue 4, pp. 1211-1250
- Global Surface Summary of the Day (NOAA) <https://data.nodc.noaa.gov/cgi-bin/iso?id=gov.noaa.ncdc:C00516>
- Hydrologic and Water Quality System (HAWQS) - web-based interactive water quantity and quality modeling system. [Электронный ресурс], доступ по ссылке <https://epahawqs.tamu.edu/>
- Horton R. E. Erosional development of streams and their drainage basins: hydro-physical approach to quantitative morphology // Geol. Soc. Am. Bull., 1945, Vol. 56, № 36, P. 275-370.
- Internet database ECA&D ссылка: ECA&D (2013). "European Climate Assessment & Dataset (ECA&D). Report 2008". European Climate Support Network of EUMETNET: 70 pp [www.ecad.eu/](http://www.ecad.eu/)
- Nachtergaele, F., Van Velthuizen, H., Verelst, L., Batjes, N., Dijkshoorn, K., Van Engelen, V., Fischer, G., Jones, A., Montanarella, L., Petri, M., et al. (2008) Harmonized World Soil Database. Food Agric. Organ. U. N. [Электронный ресурс], доступ по ссылке <http://www.fao.org> [15.03.2017]

## Small river runoff modeling using SWAT (case study on Velesa river, Zapadnaya Dvina basin)

***Kazachuk A.A., Terskii P.N.***

*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation*

*[alenaishappy@ya.ru](mailto:alenaishappy@ya.ru)*

**Abstract:** In this paper authors concentrate on the problem of water runoff calculation for small catchment of Velesa river using SWAT hydrological model. The results of model setup, parameters sensitivity analysis, calibration and validation are the set of quantitative values of the sensitive parameters, monthly river runoff and water balance components. Calibrated model allows filling gaps in observed data based on calculated monthly discharges.

**Keywords:** Hydrological modeling, river runoff, Velesa, SWAT, parameter calibration, model sensitivity and uncertainty





Международная конференция памяти  
выдающегося русского  
гидролога Ю.Б. Виноградова

# ГРАНИ ГИДРОЛОГИИ

2018

ТРЕТЬИ ВИНОГРАДОВСКИЕ ЧТЕНИЯ

# ГРАНИ ГИДРОЛОГИИ

Сборник материалов

28-30 марта 2018

Санкт-Петербургский государственный университет

