

Оригинальная статья

УДК 502/504:551.49:627.81

DOI: 10.26897/1997-6011-2022-4-107-113

ОПЫТ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПАВОДКОВОГО СТОКА РЕКИ КУБАНЬ К КРАСНОДАРСКОМУ ВОДОХРАНИЛИЩУ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ DWAT

ПЕРМИНОВ АЛЕКСЕЙ ВАСИЛЬЕВИЧ¹✉, канд. техн. наук, доцент
alexperminov@mail.ru

ЕРМОЛАЕВА ОЛЬГА СЕРГЕЕВНА¹, старший преподаватель
ol_ermolaeva@mail.ru

КУЗНЕЦОВА ЕЛЕНА ВЯЧЕСЛАВОВНА², гидролог отдела речных гидрологических прогнозов
helenak98@mail.ru

ИЛЬНИЧ ВИТАЛИЙ ВИТАЛЬЕВИЧ¹, канд. техн. наук, профессор
vilinitch@gmail.com

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, г. Москва, Тимирязевская ул., 49, корп. 28, Россия

² ФГБУ «Гидрометцентр России»; 123376, г. Москва, Большой Предтеченский переулок, д. 13, стр. 1, Россия

Основная цель исследований – проверка гипотезы об адекватности результатов моделирования паводкового стока реальным данным на водосборе Краснодарского водохранилища с помощью математической модели Dynamic Water Resources Assessment Tool (Инструмент динамической оценки водных ресурсов) – DWAT. Показано компьютерное моделирование максимального стока рек Кубани, впадающих в Краснодарское водохранилище, после ливневых дождей. Использовалась математическая модель типа «Осадки-сток» – DWAT. Эта модель рекомендована Всемирной метеорологической организацией для использования на реках с внезапными паводками на основе цифровых моделей рельефа рек и прогнозов ливневых дождей. Показана возможность использования предложенного подхода, оценена возможность использования DWAT для краткосрочного прогноза паводкового притока в Краснодарское водохранилище по данным о ливневых осадках на метеостанциях-предикторах. Это предварительно оценено на основе анализа зависимости основных элементов паводков по характеристике ливневых дождей. В дополнение к цифровой модели рельефа в модели используются слои с географической привязкой данных о растительности, типах землепользования и почвах водосбора. В целом показан процесс ввода и обработки данных в модель. Полученные окончательные результаты моделирования выражены прогнозным гидрографом, который сравнивается с наблюдаемыми истинными значениями. Графики прогнозируемых паводков в достаточной степени соответствуют наблюдаемым, и в целом максимальные расходы воды прогнозируемых паводков, полученные с помощью исследуемой модели по предшествующим осадкам, в большинстве своем несколько выше наблюдаемых, что отчасти объясняется пространственными данными ввиду используемого разрешения карты. Использование более подробных исходных данных и разрешения карты может улучшить конечный результат.

Ключевые слова: DWAT, модель «Осадки-сток», прогноз паводкового стока, сток к водохранилищу, цифровая модель рельефа

Формат цитирования: Перминов А.В., Ермолаева О.С., Кузнецова Е.В., Ильнич В.В. Опыт компьютерного моделирования паводкового стока реки Кубань к Краснодарскому водохранилищу на основе модели DWAT // Природообустройство. – 2022. – № 4. – С. 107-113. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-4-107-113.

© Перминов А.В., Ермолаева О.С., Кузнецова Е.В., Ильнич В.В., 2022

Original article

EXPERIENCE OF COMPUTER SIMULATION OF FLOOD RUNOFF OF THE KUBAN RIVER TO THE KRASNODAR RESERVOIR BASED ON THE DWAT MODEL

PERMINOV ALEXEY VASILIEVICH^{1✉}, candidate of technical sciences, associate professor
alexperminov@mail.ru

ERMOLAEVA OLGA SERGEEVNA, senior lecturer
ol_ermolaeva@mail.ru

KUZNETSOVA ELENA VYACHESLAVOVNA², hydrologist of the Department of river hydrological forecasts
helenak98@mail.ru

ILJINICH VITALY VITALIEVICH¹, candidate tech. sciences, professor
vilinitch@gmail.com

¹ Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after C.A. Timiryazev; 127434, Moscow, Timiryazevskaya St., 49, building 28.Russia

² FSBU «Hydrometeorological Center of Russia», 123376, Moscow, Bolshoy Predtechensky pereulok, 13, building 1, Russia

The article is dedicated to PC modeling of the maximum water runoff of the Kuban rivers flowing to the Krasnodar reservoir after the storm rains. A mathematical model of the «precipitation-runoff» type – DWAT was used. This model is recommended by the World Meteorological Organization for use on rivers with flash floods, based on river survey digital elevation models and storm rain forecasts. A possibility of using proposed approach, the estimated possibility of using DWAT for short-term forecasting of flood inflow to the Krasnodar reservoir based on storm precipitation at predictor meteorological stations, which is tentatively assessed based on the analysis of the dependence of the main elements of floods on the storm rain characteristics. In addition to the digital relief model, the model uses georeferenced layers of data on vegetation, land use types and soils of the catchment area. In general, the article shows the process of entering and processing data into the model. The obtained final simulation results, expressed by the forecast hydrograph, are compared with the observed true values. The forecasted flood graphs correspond sufficiently to the observed ones and in general the maximum water discharges of the forecasted floods obtained using the model under study for previous precipitation are for the most part slightly higher than the observed ones, which is partly explained by the spatial data due to map resolution used. The use of more detailed source data and map resolution may improve the final result.

Keywords: DWAT, model «precipitation-runoff», prediction of flood runoff, runoff to reservoir, digital elevation data

Format of citation: Perminov A.V., Ermolaeva O.S., Kuznetsova E.V., Iljinich V.V. Experience of computer simulation of flood runoff of the Kuban river to the Krasnodar reservoir based on the DWAT model // *Prirodobustroystvo*. – 2022. – No. 4. – S. 107-113. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-4-107-113.

Введение. Специфика режима паводкового стока реки Кубань, которая является основным притоком Краснодарского водохранилища, заключается во внезапном развитии стока, формируемого летними дождевыми осадками на фоне повышенного базового стока, формируемого в основном за счет таяния ледников [1]. Стремительное развитие паводкового стока формируется в горных и предгорных частях водосборов при прохождении через них мощных атмосферных фронтальных разделов, которые, как правило, упираются в горные водоразделы. Это приводит к дополнительному увеличению мощности развития кучево-дождевой облачности, а также к увеличению

интенсивности ливневых дождей. Такое сочетание факторов создает определенные сложности и неопределенность при моделировании паводков [2, 3]. Это налагает дополнительные требования к математическим моделям типа «Осадки-сток», которые необходимы для улучшения результатов прогноза стока, а также для увеличения надежности управления Краснодарским водохранилищем [4-7], предназначенного как для регулирования паводкового стока, так и для многолетнего регулирования стока р. Кубань в целях устойчивого обеспечения водой многочисленных потребителей.

Основная цель исследований заключалась в проверке гипотезы об адекватности

результатов моделирования паводкового стока реальным данным на водосборе Краснодарского водохранилища с помощью математической модели *Dynamic Water Resources Assessment Tool* (Инструмент динамической оценки водных ресурсов) – *DWAT* [8, 9]. Для достижения этой цели на основе доступных пространственных данных была создана пространственная модель водосбора р. Кубань, включавшая в себя слои данных рельефа земной поверхности, а также почвенного и растительного покрова. Для моделирования стока были использованы ряды фактических данных интенсивностей выпадения осадков за период 1987-2020 гг. на метеостанциях Краснодар, Армавир и Минеральные Воды.

Материалы и методы исследований.

В качестве математической модели типа «Осадки-сток» для прогноза паводков апробируется *Dynamic Water Resources Assessment Tool (DWAT)* (Инструмент динамической оценки водных ресурсов) [8, 9], которая позволяет учитывать многие элементы динамики водного и теплового балансов с суточной и часовой дискретностью. Кроме того, *DWAT* позволяет классифицировать водосборный бассейн на гидрологические однородные подбассейны, чтобы можно было объективно представить характеристики стока, обусловленные различными геоморфологическими факторами, инфильтрацией, испарением, притоком грунтовых вод (можно моделировать по слоям почвы).

В целом *DWAT* использует распределенную концептуальную схему водного анализа и может функционировать как при наличии данных наблюдений за стоком, так и при их отсутствии.

Для параметризации модели используется ГИС-модуль программы (*GIS Preprocessor*). Данный модуль позволяет пользователям загружать слои пространственных данных, описывающие рельеф, характеристики почвы, типы землепользования, производя извлечение необходимых характеристик для исследуемого бассейна в целом, и для каждого выделенного подбассейна – в частности.

Информация об осадках [10] вводилась как прогнозная и была представлена последовательностью суточных значений осадков (мм) относительно продолжительных штормовых ливней с общей суммой осадков не менее 20 мм. Исходя из численных значений коэффициентов корреляции между суммой штормовых осадков и суммарным объемом паводков в качестве опорных метеостанций-предикторов были выбраны метеостанции пунктов Армавир и Минеральные Воды [11]. При этом пикам паводка предшествовали пики дождевых осадков с продолжительностью между ними не менее 2 и не более 5 сут. (рис. 1). С помощью такого гидрографа имеется возможность выявить начало сработки водохранилища и ее объем. Затем можно существенно это уточнить посредством модели *DWAT* [11].

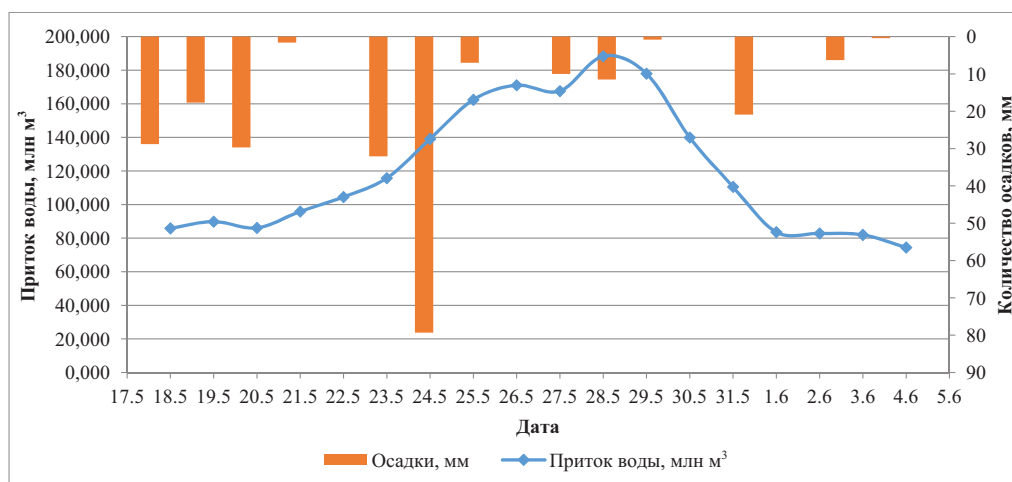


Рис. 1. Совмещенные гидрограф паводка и предшествующий ему гиетограф по данным метеостанций Армавир и Минеральные Воды за май 2017 г.

Fig. 1. Combined flood hydrograph and preceding hyetograph according to the data of the weather stations Armavir and Mineralnye Vody for May 2017

На подготовительной стадии ввода информации в программу *DWAT* с помощью ГИС-модуля были импортированы данные о рельефе. Цифровая модель рельефа (ЦМР)

была создана на основе данных модели *SRTM* [12] разрешения 90×90 м с последующим огрублением до 250×250 м, что было вызвано ограничениями модели *DWAT* по объём

входных данных. Полученная ЦМР была перепроецирована в проекцию *UTM* (37 зона), которая использовалась в дальнейшем.

На рисунке 2 представлена загруженная ЦМР в ГИС-модуль (*GIS Preprocessor*) программы *DWAT*.

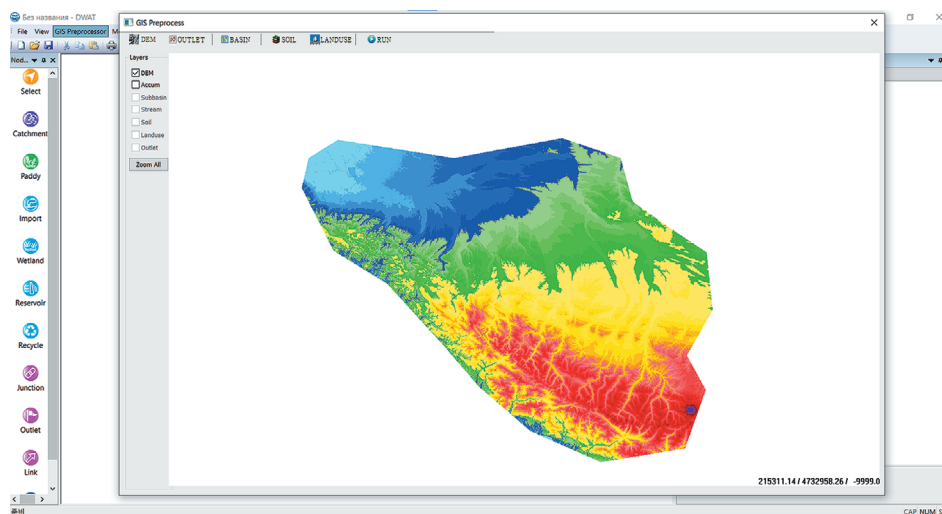


Рис. 2. Отображение слоя рельефа земной поверхности на вкладке *GIS Preprocessor*
Fig. 2. Display the relief layer of the earth's surface on the *GIS Preprocessor* tab

В качестве следующего шага для созданной модели земной поверхности (ЦМР + почвенный и растительный слой) был произведен расчет слоя суммарного стока для случая выпадения штормовых осадков на водосборе. Для этого был использован соответствующий интегрированный модуль, рассчитывающий по слою ЦМР формирование поверхностного стока с использованием модели [13].

После ввода информации о местоположении интересующей нас точки замыкающего створа (*Outlet*) у п. Пашковский программа рассчитала границы водосборной области, а также выделила под-бассейны, исходя из введенного порогового значения («*threshold*») минимальной площади выделяемых подбассейнов.

Таким образом, предусмотрена возможность увеличения или уменьшения количества выделяемых подбассейнов. В рассмотренном случае было произведено выделение 5 подбассейнов.

После выделения границ подбассейнов в программу были введены слои пространственных данных почвенных контуров. В качестве источника информации была использована цифровая почвенная карта мира на основе классификации ФАО [14]. Перед непосредственным вводом карты ФАО в *DWAT* она была обрезана по маске исследуемой территории, переведена в проекцию *UTM* (37 зона) и представлена в виде *shp*-файла в ПО *ArcGIS10.4*.

Особенностью программы *DWAT* является собственная классификация почв, и поэтому была проведена переклассификация почвенной карты по ФАО к используемой внутренней

классификации почв по *DWAT* с помощью вспомогательной таблицы выстраивания соответствий.

В качестве следующего шага в модель вводились данные о типах землепользования. В данном проекте в качестве слоя типов землепользования использовались верифицированные данные, представленные компанией *ESRI*, основанные на информации, полученной со спутника *Sentinel 2*. Так же, как и слой почвенной информации, данные о типах землепользования были предварительно обработаны в ПО *ArcGIS*. Была проведена также работа по сопоставлению двух классификаций типов землепользования (*ESRI* переклассифицирована в *DWAT*). Во внутренней классификации программы – в наличии 4 градации: проницаемые поверхности, непроницаемые поверхности, почвы покрытые растительностью и рисовые чеки, с помощью которых производится параметризация модели.

После ввода всех необходимых информационных слоев запускается обработка ГИС-модуля с помощью команды «*Run*». Программа выдает уведомление о проделанной работе, закрывает встроенный модуль ГИС, и данные отображаются в текущем проекте. Затем, после отображения проекта в программе, его можно сохранить. Но данных манипуляций еще недостаточно для корректной работы модели – в нее также необходимо загрузить метеорологические данные и пункты метеостанций.

Пункты метеостанций устанавливаются вручную приблизительно на местности с помощью ярлыка «*climate*». В текущем исследовании применялись данные с двух станций: Армавира

и Минеральных Вод. После установки местоположения метеостанций необходимо в их атрибутивной таблице указать их координаты и высоту точек над уровнем моря. Затем в атрибутивной таблице подбассейнов следует указать, на какой бассейн и какие данные метеостанций влияют, и в какой степени это происходит. Далее добавляются метеорологические данные в форме специальных таблиц, созданных в *DWAT* путем добавления данных из *Microsoft Excel*.

Когда обработка метеопараметров завершена, приступаем к отрисовке связей водосборов и точки створа. Для этого существуют 2 ячейки: «*link*» и «*output*». Ячейка «*link*» позволяет проводить связи между водосборами, точкой створа и узлами соединения; ячейка «*output*» добавляет узел соединения, необходимый для построения схемы течения реки.

Результаты формирования схемы речного бассейна представлены на рисунке 3.

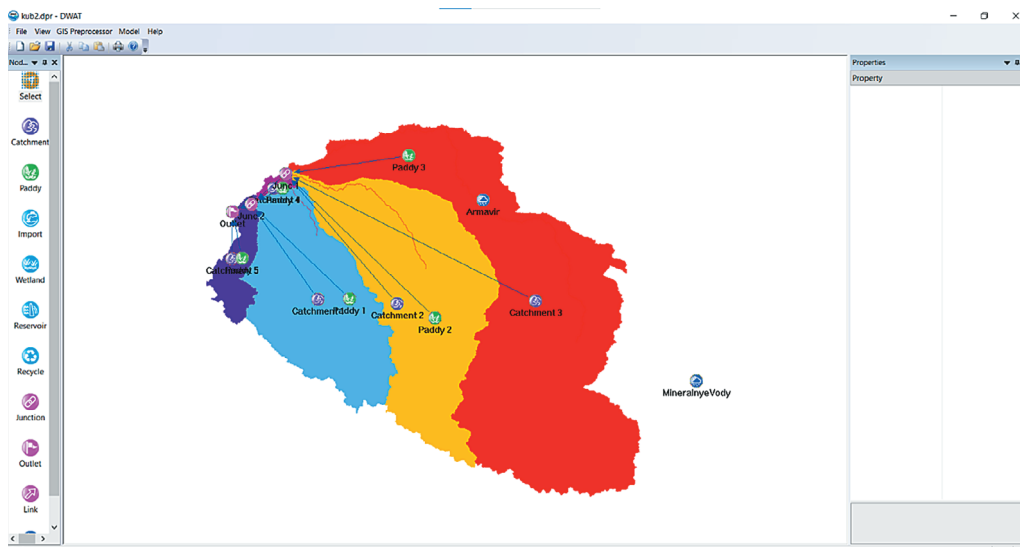


Рис. 3. Отображение схемы водосбора в рабочем поле модели

Fig. 3. Display the catchment diagram in the working field of the model

Затем необходимо запустить модель с помощью панели управления во вкладке: «*Model*». При запуске программы она предлагает выбрать период, в течение которого будет производиться прогноз, и частоту расчетов, сек. Была выбрана частота прогноза, равная 86400 сек., что равняется суткам.

Результаты и их обсуждение. После выбора специальной командой модель отправляется на расчет. После его завершения становятся доступными команды построения прогнозных графиков для различных показателей, точечных диаграмм и схема водного баланса. Для данных исследований необходима область диаграмм. При нажатии открывается окно, в котором нужно выбрать исследуемый элемент модели, в данном случае – «*Catchment*». Затем в окне ниже становятся доступными показатели, по которым можно построить график. Для решения нашей задачи необходимо выбрать поля осадков, которые вставлялись в модель и рассчитанный моделью (то есть спрогнозированный) общий сток.

Поскольку наблюдается большая численная разница между значениями двух графиков, для удобства анализа было принято решение использовать две шкалы по ординате: одна – для

интенсивностей осадков, направленная сверху вниз; а другая – для интенсивностей речного стока, направленная снизу вверх.

Показатель общего стока рассчитывается моделью, мм. Следовательно, для сравнения с фактическим дождевым паводком необходимо будет значения перевести в млн м³. Следует сказать, что форма гидрографа соответствует фактическому. В день прохождения катастрофических осадков программа смоделировала также наибольшее значение общего стока, которое можно оценить как паводок дождевого характера.

24 мая 2017 г. общий сток достигал 4,1 мм. Для перевода умножим это значение (м) на площадь всего водосбора (м²) и получим значение (млн м³) за сутки.

Получается, что при общем стоке, равном 4,1 мм, сток составляет $0,0041 \cdot 44857705000 \text{ м}^2 = 183916590,5 \text{ м}^3/\text{сут.}$ при количестве осадков, равном 79 мм. Фактический сток составляет $188000000 \text{ м}^3/\text{сут.}$

Путем сравнения можно сделать вывод о том, что прогнозное значение стока меньше фактического, но составляет 98% от него, а это имеет достаточно высокий коэффициент достоверности и оправдываемости модели.

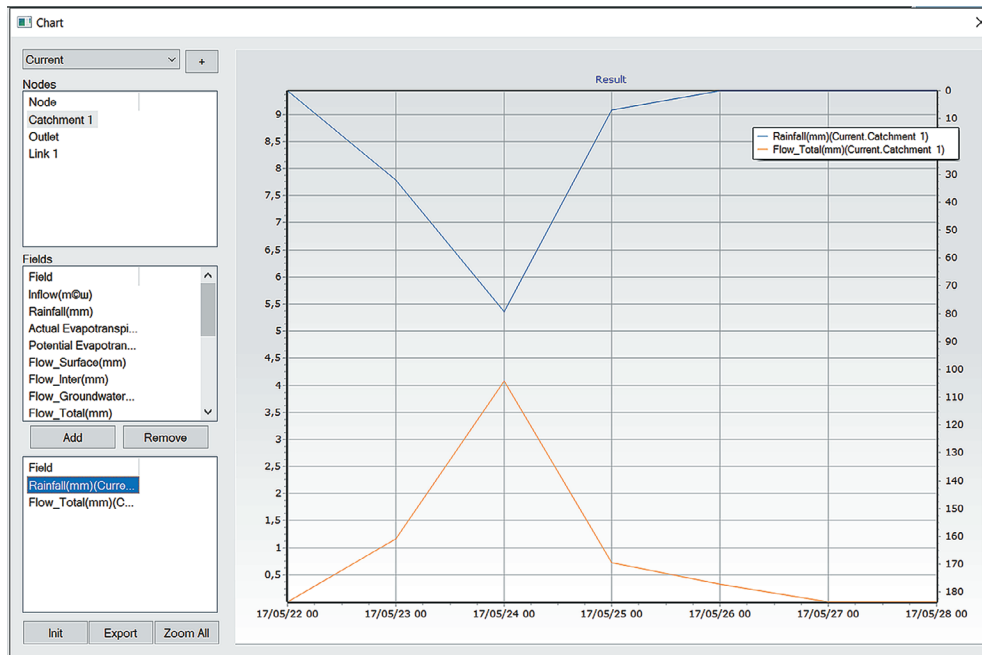


Рис. 4. Спрогнозированный гидрограф паводка в модели

Fig. 4. Predicted flood hydrograph in the model

Выводы

По данным метеостанций-предикторов можно судить о величине расходов и объемов воды последующих паводков. Также был сделан вывод о том, что период между пиком штормовых осадков и пиком паводка, приходящего к Краснодарскому водохранилищу, составляет от 2 до 5 сут.

В представленном примере модель спрогнозировала пик паводкового стока в день прохождения катастрофических (79 мм) осадков. Модель прогнозирует значение стока (мм), следовательно, требуется перевод в более удобную систему: м³/с или млн м³. При спрогнозированном стоке, равном 4,1 мм, сток составляет

$0,0041 \cdot 44857705000 \text{ м}^2 = 183916590,5 \text{ м}^3/\text{сут.}$, тогда как фактический сток составлял $188000000 \text{ м}^3/\text{сут.}$ Следовательно, относительная ошибка модели равна 2%, то есть имеет достаточно высокий коэффициент достоверности, точности и оправдываемости.

Увеличение точности прогнозирования опасных паводков должно привести к понижению рисков аварийных ситуаций с учетом прогнозов в регулировании стока. В связи с этим имеется необходимость совершенствовать и адаптировать имеющиеся модели формирования максимального стока по типу «Осадки-сток», а также изучать новые модели – например, модель DWAT.

Библиографический список

1. Лурье П.М., Панов В.Д., Ткаченко Ю.Ю. Река Кубань: гидрография и режим стока. – СПб.: Гидрометеиздат, 2005. – 500 с.
2. Борщ С.В., Симонов Ю.А. Оперативная система краткосрочных гидрологических прогнозов расхода воды на реках Кубани // Труды Гидрометцентра России. – 2013. – № 349. – С 63-68.
3. Борщ С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В. Система прогнозирования паводков и раннего оповещения о наводнениях на реках Черноморского побережья Кавказа и бассейна Кубани // Труды Гидрометцентра России. – 2015. – № 356. – С. 247-260.
4. Ильинич В.В. Имитационная модель работы водохранилища – М.: Экспресс-информация, 1982. – 4 с.
5. Iljinich V.V. Flow Control By Water Reservoir In Conditions Of Torrential Floods // Proceeding of the 11th International Conference on Hydroinformatics HIC. – USA: New York City, 2014. – Pp. 1-7.
6. Iljinich V.V. Search of Anti-Accident Function for Flood Flow Management by Water Reservoir //

References

1. Lurje P.M., Panov V.D., Tkachenko Yu.Yu. Reka Kuban: gidrografiya i rezhim stoka. – SPb.: Gidrometeoizdat, 2005. – 500 s.
2. Borsch S.V., Simonov Yu.A. Operativnaya Sistema kratkosrochnykh gidrologicheskikh prognozov raskhoda vody na rekah Kubani // Trudy Gidromettsentra Rossii. – 2013. – № 349. – S63-68.
3. Borsch S.V., Simonov Yu.A., Khristoforov A.V. Sistema prognozirovaniya pavadkov i rannego opoveschaniya o navodneniyah na rekah Chernomorskogo poberezhya Kavkaza i bassejna Kubani // Trudy Gidromettsentra Rossii. – 2015. – № 356. – S. 247-260.
4. Iljinich V.V. Imitatsionnaya model rabotyvodohranilisha. – M.: Express informatsiya, 1982. – 4 s.
5. Iljinich V.V. “Flow Control By Water Reservoir In Conditions Of Torrential Floods”. Proceeding of the 11th International Conference on Hydroinformatics HIC2014, New York City, USA (2014). CUNY, p. 1-7. Academic Works. https://academicworks.cuny.edu/cc_conf_hic/22

Proceedings of the 7-th International Conference on Hydroinformatics. – Nica, 2006. – Pp. 1025-1031.

7. **Cavalli A.B., Iljinich V.V., Veliev I.G.** Flood control by water reservoir with account of runoff forecast / G. La Loggia G. Freni, V. Puleo and M. De Marchis (eds.) // 13th International Conference on Hydroinformatics, Palermo, 1-6 July 2018 (EPiC Series in Engineering). – Vol. 3. – Pp. 395-398.

8. **Jang C.H., Kim H.J., Kim D.H., Sung J.Y., Seo H.Y.** and Kim H.R. DWAT. – User's Manual. – 2022. – V. 3.

9. **Simonov Y., Quirno M.U.** and Kanyike T. Recommendations on Dynamic Water Resources Assessment Tool (DWAT) applications, 2019

10. **Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Александрова Т.М.** Описание массива данных суточной температуры воздуха и количества осадков на метеорологических станциях России и бывшего СССР.

11. **Кузнецова Е.В.** Прогноз паводкового притока к Краснодарскому водохранилищу: Маг. дис. – М.: РГАУ-МСХА, 2022. – 116 с. – URL: <https://srtm.csi.cgiar.org/>.

12. **Ермолаева О.С., Зейлигер А.М.** Компьютерный код расчета гидрографических характеристик речной сети и ее водосборной территории по результатам гидрологического анализа цифровой модели рельефа // Экология. Экономика. Информатика: Сборник статей: В 2 т. / Институт аридных зон, Южный научный центр РАН. – Ростов-на-Дону: Южный научный центр РАН, 2016. – С. 64-80. – EDN WXJITD.

13. FAO soils portal. – URL: <https://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-maps-and-databases/en/>.

Критерии авторства

Перминов А.В., Ермолаева О.С., Кузнецова Е.В., Ильинич В.В. выполнили теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись. Имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов.

Статья поступила в редакцию 30.07.2022

Одобрена после рецензирования 12.09.2022

Принята к публикации 19.09.2022

6. **Iljinich V.V.** “Search of Anti-Accident Function for Flood Flow Management by Water Reservoir”, Proceedings of the 7-th International Conference on Hydroinformatics 2006, Nica, (2006) pp. 1025-1031.

7. **Cavalli A.B., Iljinich V.V., Veliev I.G.** Flood control by water reservoir with account of runoff forecast. // G. La Loggia G. Freni, V. Puleo and M. De Marchis (eds.), HIC2018, 13th International Conference on Hydroinformatics, Palermo, 1-6 July 2018, (EPiC Series in Engineering, vol. 3), pp. 395-398.

8. Jang, CH., Kim, HJ., Kim, DH., Sung, JY., Seo, HY. and Kim, HR. DWAT -User's Manual v1.3., (2022).

9. **Simonov Y., Quirno M.U.,** and Kanyike T. Recommendations on Dynamic Water Resources Assessment Tool (DWAT) applications, 2019

10. **Bulygina O.N., Razuvaev V.N., Alexandrova T.M.** Opisaniye massiva dannyh sutochnoy temperatury vozduha i kolichestva osadkov na meteorologicheskikh stantsiyah Rossii i byvshego SSSR

11. **Kuznetsova E.V.** Prognoz pavodkovogo pri-toka k Krasnodarskomu vodохранилищy (mag. dis.), RGAU-MSHA imeni K.A. Timiryazeva, 2022. – 116 s. <https://srtm.csi.cgiar.org/>

12. **Ermolaeva O.S., Zeyliger A.M.** Kompjyuterny kod rascheta gidrograficheskikh harakteristik rechnoj seti i ee vodosbornoj territorii po rezultatam gidrologicheskogo analiza tsifrovoy modeli reljefa // Ekologiya. Ekonomika. Informatika: sbornik statej: v 2-h t. / Institut aridnyh zon, Yuzhny nauchny tsentr RAN. – R/na Donu: Yuzhny nauchny tsentr RAN, 2016. – S. 64-80. – EDN WXJITD

13. FAO soils portal: <https://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-maps-and-databases/en/>

Criteria of authorship

Perminov A.V., Ermolaeva O.S., Kuznetsova E.V., Iljinich V.V. carried out theoretical studies, on the basis of which they generalized and wrote the manuscript. Perminov A.V., Ermolaeva O.S., Kuznetsova E.V., Iljinich V.V. have a copyright on the article and are responsible for plagiarism.

Conflict of interests

The authors state that there are no conflicts of interests

The article was submitted to the editorial office 30.07.2022

Approved after reviewing 12.09.2022

Accepted for publication 19.09.2022