

УДК 556.166.4:627.512

DOI: 10.34753/HS.2021.3.3.250

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАВОДКОВ 2005 ГОДА В БАССЕЙНЕ РЕКИ КАМЫ

А.Л. Ветров¹, А.А. Тиунов^{2,3}

¹Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Россия; ²ФГБУ «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», Камский филиал, г. Пермь, Россия; ³Горный институт Уральского отделения Российской академии наук – филиал ФГБУН «Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук», г. Пермь, Россия

vetrov@psu.ru

FLOOD SIMULATION IN THE KAMA RIVER BASIN 2005

Andrey L. Vetrov¹, Aleksei A. Tiunov^{2,3}

¹Perm State University, Perm, Russia
²Kama branch of FSBI Russian Research Institute for the Integrated Use and Protection of Water Resources, Perm, Russia
³Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences – a branch of the Federal State Budgetary Institution of Science of the Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russia

vetrov@psu.ru

Аннотация. Глобальное потепление климата увеличивает общее влагосодержание атмосферы, что создает благоприятные условия для формирования интенсивных обложных осадков и ливней. Современные системы предупреждения о паводках все еще недостаточно эффективны, особенно в местах с редкой сетью метеорологических наблюдений. Математические модели атмосферы, построенные на полных уравнениях гидродинамики, позволяют с достаточной заблаговременностью рассчитать интенсивность осадков с высокой детализацией. В данной работе изучен вопрос объединения региональной негидростатической модели атмосферы Weather Research and Forecasting Model (динамическое ядро Advanced Research) с гидрологической моделью RiverFlow 2 Dimension Graphics Processing Unit с целью оценки точности воспроизведения дождевых паводков 23 и 24 июня 2005 года на двух реках Уральского Прикамья: реке Усьве и реке Обве. Подъем уровней воды в реках был обусловлен конвективными и обложными осадками на фронтальных системах глубокого южного циклона. В отдельных пунктах наблюдения выпало до 50 мм осадков за период в 12 часов. На первом этапе исследования были получены

Abstract. Climate warming is causing an increase in the total moisture content on the planet and in the number of heavy rainfall cases. Modern flood warning systems are still not effective enough, especially in places with a sparse network of meteorological observations. Mathematical models of the atmosphere based on complete equations of hydrodynamics allow us to calculate the intensity of precipitation with high detail with sufficient advance. This paper examines the issue of combining a regional atmospheric model WRF-ARW with a hydrological model for RiverFlow 2D GPU size in order to assess the accuracy of reproduction of rain floods on two rivers of the Ural Kama region: Usva and Obva on June 23-24, 2005. The rise of water levels in the rivers was caused by convective and frontal precipitation on the frontal systems of a deep southern cyclone. In some observation points, up to 50 mm of precipitation fell during the period of 12 hours. At the first stage of the study, model precipitation fields were obtained in nodes of a regular grid with a step of 3 km. The simulation was performed under the condition of non-hydrostatic approximation and direct (without parameterization) simulation of convection on the calculated grid. Then the procedure of preliminary assimilation of precipitation by the hydrological model was carried out. For a mountainous, an underestimation of flood

модельные поля осадков в узлах регулярной сетки с шагом 3 км. Моделирование выполнялось при условии негидростатического приближения и прямого (без параметризаций) моделирование конвекции на расчетной сетке. Затем была проведена процедура предварительного усвоения осадков гидрологической моделью. Для горной территории обнаружено занижение расходов воды в паводок по сравнению с фактическими данными. Для водосбора реки Обвы выявлено завышение максимальных расходов воды по сравнению с фактическими данными. Для увеличения точности прогноза максимальных уровней воды требуется учесть процессы испарения и инфильтрации за период, предшествующий развитию паводка. Полученные результаты могут учитываться при подготовке прогнозов возникновения сильных дождей, разработке технологий прогноза паводков.

Ключевые слова: паводки; моделирование; сильный дождь; WRF_ARW; численная гидрологическая модель; RiverFlow 2D GPU.

Введение

Современные гидрологические исследования строятся на использовании численных гидрологических моделей. В ряде работ [Беликов и др., 2020; Васильева и др., 2021] предложено сочетание численного моделирования быстроразвивающихся дождевых паводков в горных районах на двух моделях: STREAM 2D CUDA, основанной на численном решении уравнений мелкой воды в двухмерной (плановой) постановке по оригинальному алгоритму, и KW-GIUN-модели геоморфологического мгновенного единичного гидрографа, основанной на уравнении кинематической волны. Кроме этого, для Черноморского побережья Кавказа предложена физико-статистическая модель формирования талого и дождевого стока для шести водосборов [Христофоров, Юмина, Беякова, 2015]. Итогом исследования стала система краткосрочного

water consumption was found in comparison with the actual data. For the Obva River catchment, an overestimation of the maximum costs compared to the actual costs was revealed. To increase the accuracy of the forecast of maximum levels, it is necessary to take into account the processes of evaporation and infiltration for the period preceding the development of the flood. The results obtained can be taken into account when preparing forecasts of heavy rains occurrence and when developing flood forecast techniques.

Keywords: floods; simulation; heavy rain; WRF-ARW; numerical hydrological model; RiverFlow 2D GPU.

прогнозирования расходов и уровней воды для предупреждения наводнений стокового происхождения.

Среди существующих в настоящее время информационно-моделирующих систем следует особо отметить разработку «Европейской системы информирования о наводнениях» (European Flood Awareness System, EFAS), которая предназначена для прогнозирования наводнений в речных бассейнах Европы [Smith et al., 2016].

В целом, несмотря на обширный набор гидрологических моделей паводков, исследователями мало уделяется внимания возможностям использовать прогностические данные региональных моделей атмосферы для увеличения точности и заблаговременности прогноза. Цель данного исследования – провести оценку качества двойного моделирования развития паводков: в атмосфере и на водосборе.

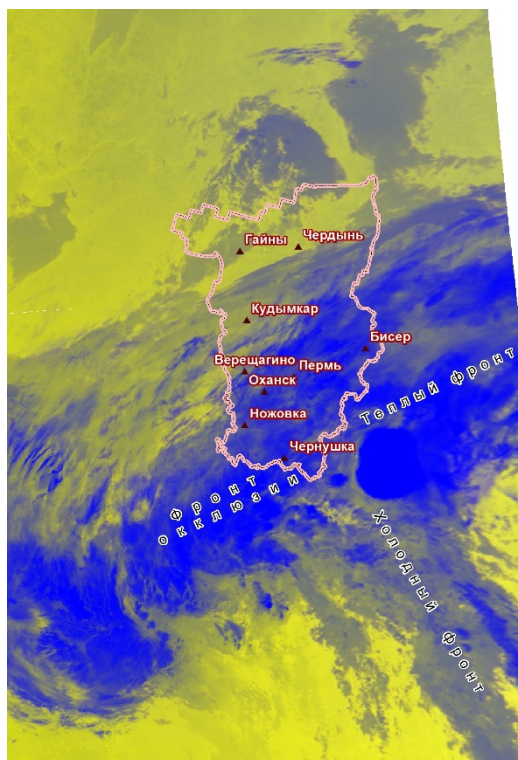


Рисунок 1. Спутниковый снимок облачности над Уральским Прикамьем 21 июня 2005 года в 17:35 ВСУ. Снимок с сайта «База данных опасных явлений погоды Пермского края» (<http://accidentbase.maps.psu.ru/accidentinfo.php?id=669>).

Figure 1. Satellite image of cloud cover over the Ural Prikamye on June 21, 2005 at 17:35 UTC. The picture was taken from the website Database of dangerous weather phenomena of the Perm Territory (<http://accidentbase.maps.psu.ru/accidentinfo.php?id=669>).

Таблица 1. Оценка качества прогноза осадков моделью WRF-ARW.

Table 1. Assessment of the quality of precipitation forecast by the WRF-ARW model.

№ п/п	Метеостанция/Агропост	Наблюдение (12 ч)	Прогноз
1	Чайковский	55,8	14,5
2	Ножовка	33,2	50,1
3	Оханск	30,0	14,1
4	Бисер	35,6	30
5	Пермь	46,7	18,3
6	Калинино	38,2	19,2
7	Кудымкар	1,0	10,9
8	Чердынь	0,0	0,0
9	Гайны	0,3	0,1

Материалы и методы исследования

Для исследования были выбраны летние дождевые паводки 23–24 июня 2005 года на реках Уральского Прикамья. Их причиной были сильные осадки в ночь с 21 на 22 июня 2005 года

из-за глубокого южного циклона с атмосферным давлением в центре 994 гПа (давление приведено к уровню моря). Циклон находился в стадии окклюдирования и на бассейн реки Камы оказывал влияние интенсивный фронт окклюзии рисунок 1.

Осадки с интенсивностью более 50 мм за 12 часов (таблица 1) спровоцировали паводки на многих реках бассейна реки Камы, в том числе на реке Обве и реке Усьве.

Физико-географические условия Уральского Прикамья неоднородны: ландшафты переходят от равнины к горам, распаханная территория сочетается с таежными и смешанными лесами. Наиболее типичны – умеренно-расчлененные, холмисто-увалистые ландшафты и низкогорные ландшафты Среднего Урала. Представляет интерес сравнение развития паводков на водосборах разного характера при общем синоптическом контексте формируемых осадков.

Река Обва находится в Иньвенском Обвинском гидрологическом округе правобережья реки Камы. Основная покатость ландшафта с запада на восток, от увалов Верхнекамской возвышенности к долине реки Камы. Рельеф умеренно-расчлененный. В исследовании рассматривалась только часть водосбора реки до гидрологического поста Карагай. Средний уклон реки в пределах водосбора – 0,5%, лесистость – 58%. Исследуемый водосбор реки покрыт лесами южнотаежного типа с преобладанием ели, пихты, липы, с мелколиственными породами на горях и вырубках. Средняя высота водосбора – 200 м.

Река Усьва в гидрологическом отношении – река Уральской горной страны и Западно-Уральского горного округа. Река протекает по уральскому низкогорью в межгорной котловине. В исследовании рассматривалась только часть водосбора реки до гидрологического поста Усьва. Средний уклон реки – 1,4%. Площадь водосбора покрыта типичной горной тайгой (елово-пихтовая с примесью лиственницы и кедра), лесистость – 83%. Средняя высота водосбора – 456 м.

Для моделирования полей осадков использовался программный комплекс WRF (версия 3.9.1.1) с динамическим ядром ARW, установленный на суперкомпьютере «ПГНИУ-Кеплер». Для получения начальных и граничных условий использовались данные реанализа NCEP-GFS и NCEP-CFS (США), представленные в коде GRIB-2. При этом технические возможности суперкомпьютера позволяли реализовать негидростатическое приближение и прямое (без параметризаций) моделирование конвекции на расчетной сетке с шагом 3,0 км. Счет модели проводился с продолжительностью 27 ч, начиная с 00 ч ВСВ.

Для автоматического получения, обработки и визуализации выходных данных модели WRF применялись специально разработанные скрипты для операционной системы Linux и программного комплекса OpenGrADS. Обработка выходных данных проводилась с использованием геоинформационной системы QGIS. Точность восстановления полей осадков по модельным данным оценивалась путем сопоставления расчетного количества осадков с фактически наблюдавшимся на метеостанциях.

Расчет расходов воды проводили с использованием гидрологической и гидравлической модели в среде RiverFlow 2D GPU¹. Для исследования применялась треугольная нерегулярная сетка со средней длиной ребра – 30 м. Цифровая модель рельефа водосборов рек Обвы и Усьвы строилась на основе топографических карт масштаба 1:100 000, которые есть в свободном доступе. Карты были подвергнуты оцифровке и обработке в географической информационной системе ArcMap.

¹ Reference Manual «RiverFlow2D Two-Dimensional River Dynamics Model» August, 2016, Hydronia LLC. URL: <http://www.hydronia.com> (дата обращения: 04.09.2021).

Таблица 2. Характеристики модели RiverFlow 2D GPU для разных водосборов.**Table 2.** Characteristics of the RiverFlow 2D GPU model for different watersheds.

Параметры модели	река Обва	река Усьва
Количество элементов сетки	9 513 312	5 014 200
Число узлов сетки	4 763 605	2 512 806

Подготовка цифровой модели рельефа и разграничение водосборного бассейна реки Усьвы и реки Обвы для проведения гидрологических расчетов производилась в приложении ArcMAP 10.4 с помощью группы инструментов «Гидрология» из набора инструментов Spatial Analyst с использованием трехмерных снимков SRTM (Shuttle radar topography mission), полученных на сайте SRTM Data – CGIAR-CSI SRTM². В нашем случае это был файл растровых данных размерами 5x5 градусов «srtm_48_01.tif» в географической системе координат WGS-84.

По водосборному бассейну реки Усьвы площадь моделируемой земной поверхности на местности составила 2 230 км², изменение по высоте от 196,5 до 1 094,1 м БС. По водосборному бассейну реки Обвы площадь моделируемой земной поверхности на местности составила 4 280 км², изменение по высоте от 120,0 до 330,7 м БС. Дополнительные характеристики приведены в таблице 2.

Результаты и их обсуждение

Для моделирования внезапного паводка были использованы данные WRF-ARW о количестве осадков за 12 часов (с 15 часов ВСВ 21 июня до 03 часов ВСВ 22 июня 2005 года). Распределение осадков было принято неравномерным по всей площади бассейна (рисунки 2, 3).

На представленных рисунках видно, что области максимальных осадков располагались юго-восточнее, в случае водосбора реки Усьвы, и зона с максимальными осадками от 25 до 30 мм за 12 часов затронула только крайний восток бассейна. В целом водосбор попал под воздействие ливневых осадков с интенсивностью от 15 до 30 мм за 12 часов. Достоверность такой картины распределения осадков подтверждается данными наблюдениями на метеостанции Губаха. Здесь за 12 часов выпало менее 30 мм осадков. Спутниковый снимок облачности, представленный на рисунке 1, подтверждает прогностическое распределение осадков.

Иная ситуация сложилась на водосборе реки Обвы. Максимальная зона осадков охватила центральные и южные районы водосбора. Практически треть водосборной площади попало под проливной ливень интенсивностью 30 мм за 12 часов. Менее значимые осадки интенсивностью 10 мм за 12 часов прошли на севере водосбора. По данным метеостанции Верещагино выпало 56,9 мм за 24 часа. Можно предположить, что большая часть осадков выпала в ночь между 21 и 22 июня 2005 года. Удовлетворительное соответствие прогностических модельных данных и данных наблюдений можно также обнаружить в ранее представленной таблице 1. Для таких сложных для прогнозирования процессов средняя абсолютная ошибка составила 21 мм.

² Download Manager [Электронный ресурс] // SRTM Data – CGIAR-CSI SRTM. URL: <https://srtm.csi.cgiar.org/srtmdata/> (дата обращения: 04.09.2021)

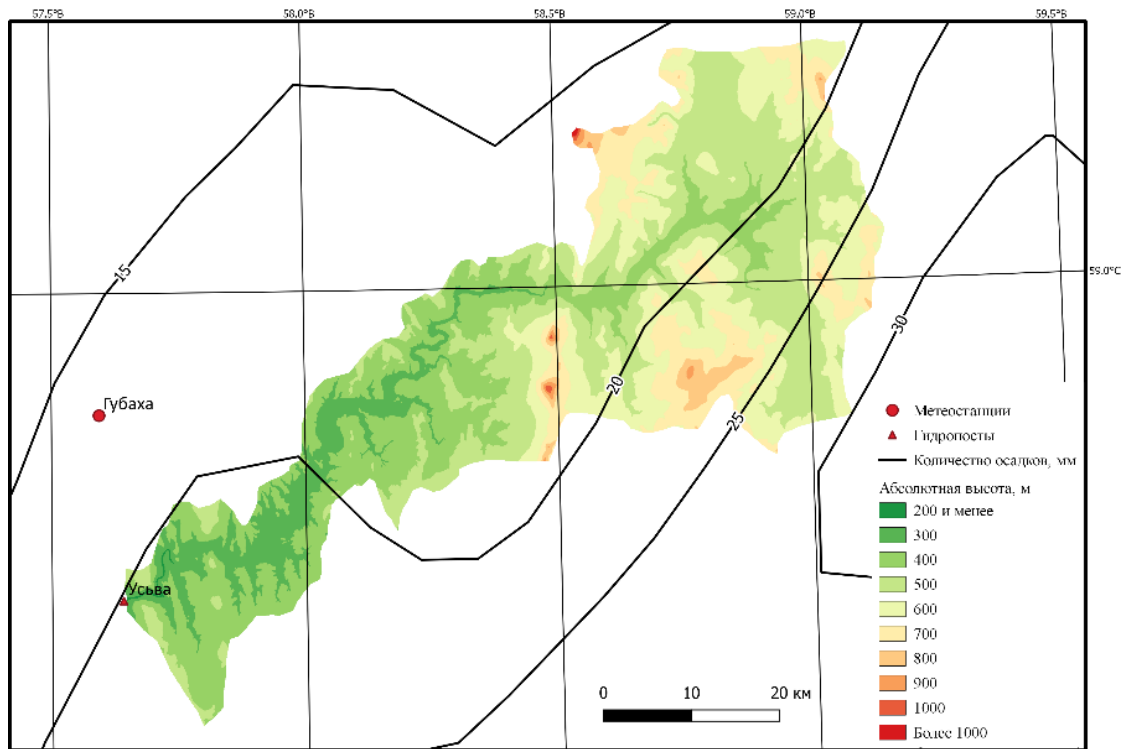


Рисунок 2. Водосбор реки Усьвы и прогностические изогеты по данным модели WRF-ARW на 22 июня 2005 года 03 часа ВСВ.

Figure 2. The catchment of the Usva River and prognostic isohyets based on the WRF-ARW model data for June 22, 2005 03:00 UTC

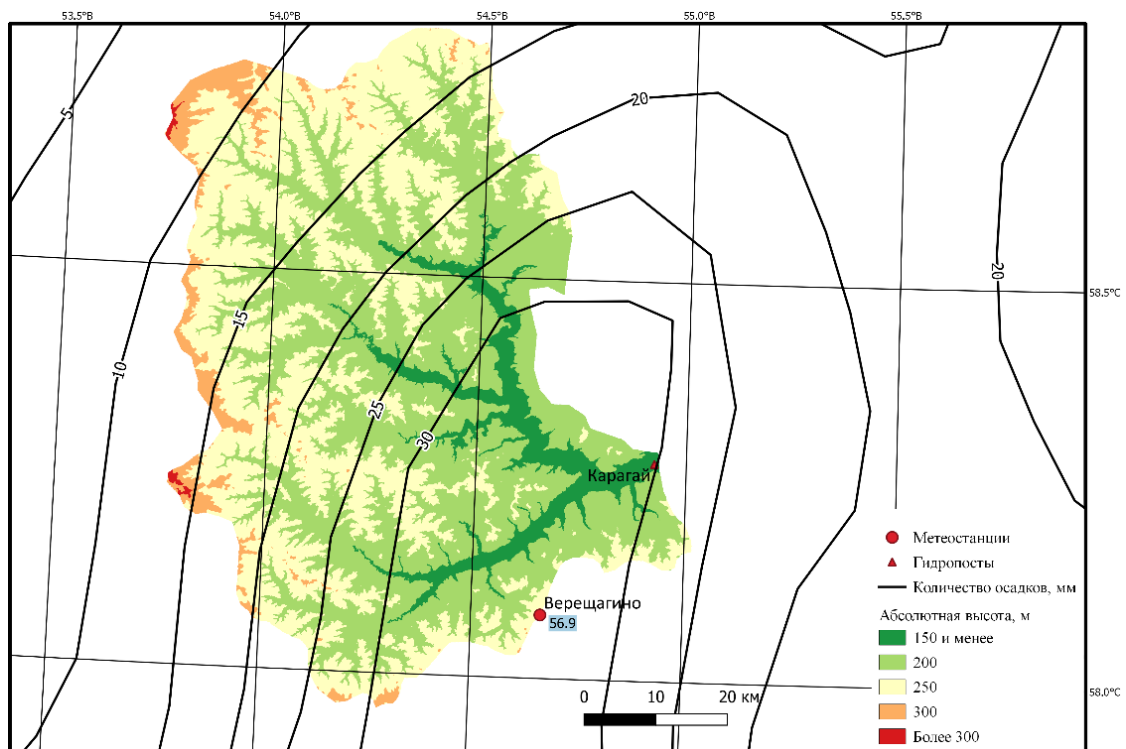


Рисунок 3. Водосбор реки Обва и прогностические изогеты по данным модели WRF-ARW на 22 июня 2005 года 03 часа ВСВ.

Figure 3. The catchment of the Obva River and prognostic isohyets based on the WRF-ARW model data for June 22, 2005 at 03:00 UTC.

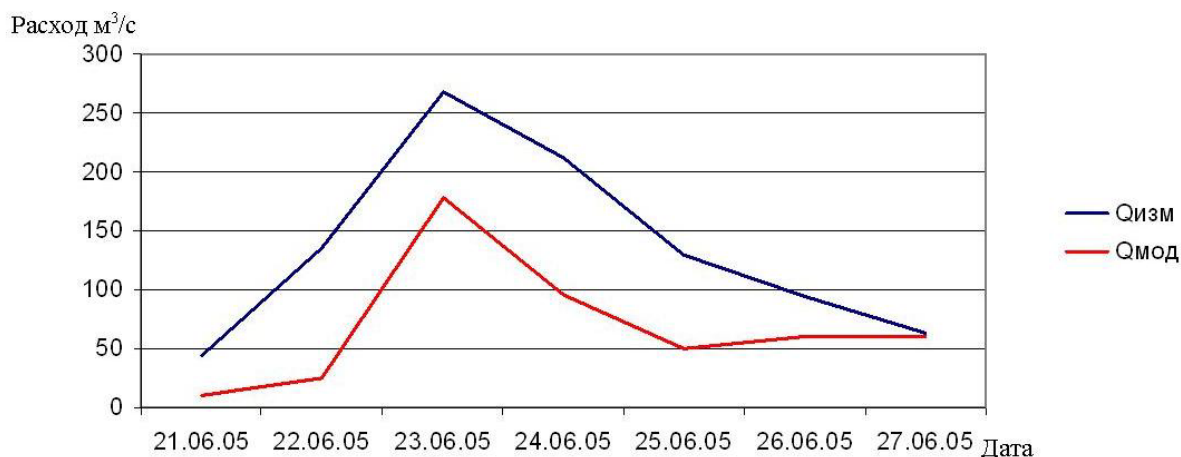


Рисунок 4. Расчетный гидрограф расхода воды ($Q_{\text{мод}}$) по створу гидрологического поста Усьва и данные наблюдений ($Q_{\text{изм}}$).

Figure 4. Calculated hydrograph of water discharge ($Q_{\text{мод}}$) of the Usva hydrological station and observation data ($Q_{\text{изм}}$).

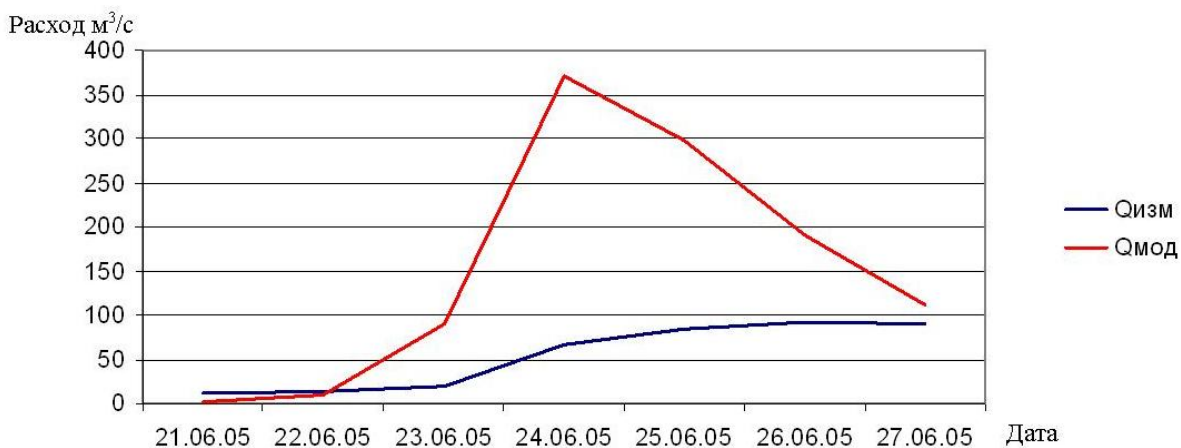


Рисунок 5. Расчетный гидрограф расхода воды ($Q_{\text{мод}}$) по створу гидрологического поста Карагай и данные наблюдений ($Q_{\text{изм}}$).

Figure 5. Calculated hydrograph of water discharge ($Q_{\text{мод}}$) of the Karagai hydrological station and observation data ($Q_{\text{изм}}$).

На следующем этапе ставилась задача моделирования сбора выпавших осадков по площади водосбора и моделирование движения паводочной волны по руслу рек. На нижней границе модели по створу гидрологических постов Усьва и Карагай ставилось условие свободного вытекания воды. При моделировании стока испарение и инфильтрация почвы не учитывались. В результате расчета были получены гидрографы расходов воды по створам гидрологических постов Усьва и Карагай (рисунки 4, 5).

В целом для гидрографа по створу гидрологического поста Усьва можно заключить, что модельные данные точно воспроизводят время наступления пика паводка, но значительно занижают его интенсивность. Расчетный среднесуточный расход воды на пике составил $178 \text{ м}^3/\text{с}$ на 23 июня 2005 года, что на 43% меньше измеренного расхода воды по данным сайта «Информационная система по водным ресурсам и водному хозяйству бассейнов рек России»³. Для повышения точности расчетов в данном случае требуется учесть предыдущие и последующие

³ Информационная система по водным ресурсам и водному хозяйству бассейнов рек России [Электронный ресурс] // ГИС-портал Центра Регистра и Кадастра. URL: <http://gis.vodinfo.ru/> (дата обращения: 04.09.2021).

ливни на территории водосбора. Кроме того, требуется уточнение коэффициента шероховатости русла реки. Так, в работе [Виноградов и др., 2019] отмечается важность корректной оценки этого параметра.

Обратная ситуация сложилась при моделировании паводка на водосборе реки Обвы (рисунок 5). Несмотря на малые уклоны по исследуемому водосбору, расчетные паводочные расходы воды значительно превысили фактически измеренные. Расчетный среднесуточный расход воды на пике составил 369,7 м³/с на 23 июня 2005 года, а реальный наблюдался 26 июня 2005 года и был в четыре раза меньше – 91,2 м³/с. Игнорирование в модели инфильтрации и перехвата осадков растительностью привело к большой ошибке прогноза и чрезмерной скорости формирования и движения паводочной волны. В будущем для рассматриваемого водосбора необходимо уточнить типы землепользования и учесть задерживающие и инфильтрующие способности водосбора, что позволит сгладить модельный пик паводка и растянуть его длительность.

Благодарности

Авторы благодарят Сергея Владимировича Костарева за помощь при подготовке рисунков. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта № 20-45-596031.

Литература

Беликов В.В., Алексюк А.И., Васильева Е.С., Белякова П.А. Новый подход к численному моделированию быстроформирующихся паводков на горных водосборах // Сборник докладов международной научной конференции памяти выдающегося русского ученого Юрия Борисовича Виноградова «Четвертые Виноградовские чтения. Гидрология: от познания к мировоззрению» (г. Санкт-Петербург, 23–31 октября 2020 года). СПб.: Изд-во ВВМ, 2020. С. 35–40.

Васильева Е.С., Белякова П.А., Алексюк А.И., Селезнева Н.В., Беликов В.В. Моделирование быстроразвивающихся паводков на малых реках

Выводы

В ходе исследования установлено:

- использование региональной модели атмосферы WRF-ARW позволяет уточнить информацию о характере распределения осадков значительной интенсивности.
- совместное использование региональной модели атмосферы WRF-ARW и гидрологической RiverFlow 2D GPU в целом дает удовлетворительные результаты по расчету величины паводка для водосборов с разными физико-географическими условиями.

При дальнейшей настройке моделей требуется учесть неравномерность по времени выпадения количества осадков на водосборном бассейне, инфильтрацию и коэффициент шероховатости водотока рек. Важным моментом является учет дополнительных случаев осадков, выпавших после начала формирования паводка, что потребует увеличить заблаговременность прогноза по численной модели атмосферы.

Acknowledgments

The authors are grateful to Sergei Vladimirovich Kostarev for his help in preparing the figures. The reported study was funded by RFBR and Perm Territory, project number 20-45-596031.

References

Belikov V.V., Aleksyuk A.I., Vasil'eva E.S., Belyakova P.A. Novyi podkhod k chislenному modelirovaniyu bystroformiruyushchikhsya pavodkov na gornykh vodosborakh [A new approach to numerical modeling of rapidly forming floods in mountain catchments]. *Sbornik dokladov mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii pamyati vydayushchegosya russkogo uchenogo Yuriya Borisovicha Vinogradova «Chetvertye Vinogradovskie chteniya. Gidrologiya: ot poznaniya k mirovozzreniyu»* (g. Sankt-Peterburg, 23–31 oktyabrya 2020 goda) [Proceedings of international scientific conference in memory of outstanding Russian scientist Yury Vinogradov

Северного Кавказа с использованием современных данных автоматизированной гидрометеорологической сети // Водные ресурсы. 2021. Т. 48. № 2. С. 135–146. DOI: [10.31857/S0321059621020164](https://doi.org/10.31857/S0321059621020164).

Виноградов А.Ю., Виноградова Т.А., Обязов В.А., Кадацкая М.М. Оценка значения коэффициента шероховатости // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2019. Т. 1. № 4. С. 462–476. DOI: [10.34753/HS.2019.1.4.462](https://doi.org/10.34753/HS.2019.1.4.462).

Христофоров А.В., Юмина Н.М., Белякова П.А. Прогноз паводкового стока рек Черноморского побережья Кавказа с заблаговременностью одни сутки // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2015. № 3. С. 50–57.

Smith P.J., Pappenberger F., Wetterhall F., del Pozo J.T., Krzeminski B., Salamon P., Muraro D., Kalas M., Baugh C. On the Operational Implementation of the European Flood Awareness System (EFAS) // Flood Forecasting: A Global Perspective / T.E. Adams, T.C. Pagano (eds.). Elsevier Inc., 2016. Pp. 313–348. DOI: [10.1016/b978-0-12-801884-2.00011-6](https://doi.org/10.1016/b978-0-12-801884-2.00011-6).

«Fourth Vinogradov Conference «Hydrology: from Learning to Worldview» (St. Petersburg, Russia, October 23–31, 2020). St. Petersburg, Publ. VVM, 2020, pp. 35–40. (In Russian; abstract in English).

Khristoforov A.V., Yumina N.M., Belyakova P.A. Prognoz pavodkovogo stoka rek Chernomorskogo poberezh'ya Kavkaza s zablagovremennost'yu odni sutki [A one-day lead time flood forecast for rivers of the Black sea coast of the Caucasus]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya [Moscow University Bulletin. Series 5, Geography]*, 2015, iss. 3, pp. 50–57. (In Russian; abstract in English).

Smith P.J., Pappenberger F., Wetterhall F., del Pozo J.T., Krzeminski B., Salamon P., Muraro D., Kalas M., Baugh C. On the Operational Implementation of the European Flood Awareness System (EFAS) In: Adams T.E., Pagano T.C. (eds.) *Flood Forecasting: A Global Perspective*. Elsevier Inc., 2016, pp. 313–348. DOI: [10.1016/b978-0-12-801884-2.00011-6](https://doi.org/10.1016/b978-0-12-801884-2.00011-6).

Vasil'eva E.S., Belyakova P.A., Aleksyuk A.I., Belikov V.V., Selezneva N.V. Simulating flash floods in small rivers of the Northern Caucasus with the use of data of automated hydrometeorological network. *Water resources*, 2021, vol. 48, iss. 2, pp. 182–193. DOI: [10.1134/S0097807821020160](https://doi.org/10.1134/S0097807821020160). (Russ. ed.: Vasil'eva E.S., Belyakova P.A., Aleksyuk A.I., Selezneva N.V., Belikov V.V. Modelirovanie bystrorazvivayushchikhsya pavodkov na malykh rekakh Severnogo Kavkaza s ispol'zovaniem sovremennykh dannykh avtomatizirovannoi gidrometeorologicheskoi seti. *Vodnye resursy*, 2021, vol. 48, iss. 2, pp. 135–146. DOI: [10.31857/S0321059621020164](https://doi.org/10.31857/S0321059621020164).)

Vinogradov A.Yu., Vinogradova T.A., Obyazov V.A., Kadatskaya M.M. Otsenka znacheniya koeffitsienta sherokhovatosti [Assessment of roughness coefficient value]. *Gidrosfera. Opasnye protsessy i yavleniya [Hydrosphere. Hazard processes and phenomena]*, 2019, vol. 1, iss. 4, pp. 462–476. DOI: [10.34753/HS.2019.1.4.462](https://doi.org/10.34753/HS.2019.1.4.462). (In Russian; abstract in English).