

## Реконструкция катастрофического паводка 2014 года в бассейне р. Магаданки на основе комплексного гидрометеорологического моделирования

В.А. Куровская<sup>1\*</sup>, О.М. Макарьева<sup>2,3</sup>, Н.В. Нестерова<sup>2,4</sup>, А.Н. Шихов<sup>5</sup>, А.В. Быков<sup>5</sup>, Т.А. Виноградова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет им. Ломоносова, г. Москва

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург

<sup>3</sup>Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, Россия

<sup>4</sup>Государственный гидрологический институт, г. Санкт-Петербург

<sup>5</sup>Пермский государственный университет, г. Пермь, Россия

\*viktoriakurovskaia@gmail.com

**Аннотация.** Целью данного исследования является оценка применения детерминированной гидрологической модели Гидрограф для расчета максимальных расходов воды во время катастрофического паводка 2014 для реки Магаданки (48.5 км<sup>2</sup>, Северо-Восток РФ). Параметры модели были заданы на основе выполненных ранее региональных исследований, без калибровки. Для верификации модели Гидрограф проводился расчет с суточным шагом за период с 1971 по 2015 года. Медианная величина критерия эффективности Нэша-Сатклиффа составила 0.42 за 44 года. Учитывая отсутствие метеорологических станций непосредственно на водосборе, результаты были признаны удовлетворительными. Для расчета катастрофического паводка использовались два типа данных об осадках: информация с плювиографов на ближайшей метеостанции и распределение осадков по водосбору, полученное с помощью модели WRF. При оценке гидрографов паводка использовались как начальный, так и скорректированный наборы параметров. При исходном наборе параметров в модели наблюдалось совпадение пика паводка по времени, однако, «наблюденное» значение значительно превышало рассчитанное. В связи с этим нами был введен понижающий поправочный коэффициент в параметры инфильтрации, чтобы «вытянуть» пик паводка и увеличить его объем. Результаты показали, что объединение информации о часовых осадках с плювиографов и данных региональной метеорологической модели дает возможность моделировать наводнения в ансамблевом режиме.

**Ключевые слова:** детерминированная гидрологическая модель Гидрограф, катастрофический паводок, срочный максимальный расход воды, данные плювиографа, модель WRF, р. Магаданка.

# Reconstruction of the hazardous flood of 2014 in Magadan city based on coupled hydrometeorological modelling

V.A. Kurovskaia<sup>1\*</sup>, O.M. Makarieva<sup>2,3</sup>, N.V. Nesterova<sup>2,4</sup>, A.N. Shikhov<sup>5</sup>, A.V. Bykov<sup>5</sup>,  
T.A. Vinogradova<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

<sup>2</sup> *St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia*

<sup>3</sup> *State Hydrological Institute, St. Petersburg, Russia*

<sup>4</sup> *Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, Russia*

<sup>5</sup> *Perm State University, Perm, Russia*

\**viktoriaikurovskaia@gmail.com*

**Abstract.** The study assessed the possibility of using a deterministic distributed hydrological model Hydrograph to calculate the maximum discharge of catastrophic flood at the Magadanka River (48.5 km<sup>2</sup>, city of Magadan, North-East of Russia) in 2014. The model parameters were not calibrated but borrowed from previously performed regional modelling studies. To verify the Hydrograph model streamflow simulations with daily time step were carried out for the period 1971-2015. The median value of Nash-Sutcliffe efficiency was 0.42 for a period of 44 years, which, given the lack of a meteorological station within the catchment, made it possible to evaluate the results as satisfactory. For the catastrophic flood calculation, two types of precipitation data were used: hourly data on precipitation from the nearest weather station and distribution of precipitation for the watershed from the meteorological model WRF. The flood hydrographs were estimated for the initial and corrected sets of the model parameters. The initial set of the model parameters allowed for proper timing of the flood peak but underestimated “observed” maximum value. We introduced the decreasing correction coefficient to the infiltration parameter of the model to “stretch out” the peak and volume of hydrographs. The results have shown that combining the meteorological input from weather station and regional meteorological model may allow for successful flood simulations in ensemble mode.

**Keywords:** deterministic hydrological model Hydrograph, catastrophic flood, instant maximum discharge, pluviograph data, WRF model, the Magadanka River.

## Введение

Изменение климата вызывает существенную трансформацию гидрологического цикла. Во многих регионах России наблюдается увеличение доли и интенсивности осадков [7], что приводит к росту числа и величины наводнений. Магаданская область расположена на Северо-Востоке России. В качестве отличительных черт можно выделить муссонный климат, распространение многолетней мерзлоты и очень редкую сеть гидрометеорологических наблюдений. Наводнения наносят значительный экономический ущерб, однако система гидрологических прогнозов здесь не разработана. В 2014 году на р. Магаданке (г. Магадан) произошел катастрофический паводок, расход воды которого являлся одним из наиболее высоких за всю историю наблюдений.

Целью данной работы было применение гидрологического моделирования для расчета максимальных расходов воды, основываясь на информации с ближайшей метеостанции и данных климатической модели WRF, и оценка возможности разработки системы прогноза на основе комплексного гидрометеорологического моделирования.

## Объект исследования

Объектом исследования является бассейн р. Магаданки – г. Магадан (площадь 48.5 км<sup>2</sup>). Река впадает в Тауйскую губу Охотского моря, гидрологический пост

расположен на высоте 132 м. Средняя и максимальная высота водосбора составляет 498 и 689 м соответственно. На метеорологической станции города Магадан (высота 115 м, индекс ВМО 25913) средняя годовая температура воздуха составляет  $-2.8^{\circ}\text{C}$ , годовое количество осадков достигает 560 мм (1966-2015 гг.). Максимальные суточные осадки на станции Магадан за период наблюдения составили 108 мм в 2014 году. Рассматриваемый водосбор располагается в зоне прерывистого распространения многолетней мерзлоты, ближе к Охотскому побережью встречаются острова талых грунтов [6]. Для реки Магаданки характерен смешанный тип питания – снеговой и дождевой, при этом дождевые паводки наблюдаются в основном в летне-осенний период. Наблюдения за стоком ведутся с 1971 г. Средний суточный расход за период 1971-2017 гг. составил  $0.78 \text{ м}^3/\text{с}$ , максимальный срочный расход воды достиг  $76.8 \text{ м}^3/\text{с}$  во время паводка в 2014 г.

### **Параметризация и верификация гидрологической модели**

В работе использован метод комплексного гидрометеорологического моделирования, то есть комбинирование гидрологической модели Гидрограф [1;11;12] и модели прогноза погоды. Выбор гидрологической модели обоснован возможностью ее использования для расчета и прогноза стока в условиях распространения мерзлоты [8;10]. Одним из основных достоинств модели Гидрограф является возможность априорной оценки ее параметров, представляющих собой физические свойства ландшафтов. Применение модели Гидрограф предполагает минимальное применение методов калибровки параметров, что необходимо при расчетах и прогнозах стока в условиях нестационарности окружающей среды, когда гидрологический режим подвергается как влиянию изменений климата, так и антропогенному воздействию. Ранее модель уже использовалась для расчета максимальных расходов воды результаты были признаны удовлетворительными [3;4;5]. Для прогноза стока использованы данные региональной климатической модели WRF (Weather Research and Forecasting) [13].

В модели Гидрограф реализованы два типа схематизации водосбора. Исследуемый водосбор покрывается гексагональной сеткой, в узлах которой расположены репрезентативные точки (РТ). Для каждой РТ были получены значения координат, высоты, уклона и ориентации склона, расстояния до русловой сети. Кроме того, выделяются условно однородные ландшафты, так называемые стокоформирующие комплексы (СФК). Параметры модели, включающие в себя характеристики почвы, растительности и грунтовых вод, оцениваются для каждого СФК отдельно [1;10;12]. Параметры модели были ранее определены для горной территории Магаданской области. Параметризация проводилась на основе многолетних данных Колымской водно-балансовой станции [9]. Верификация модели проводилась для водосборов разных площадей, от очень маленьких ( $<1 \text{ км}^2$ ) до больших (тысячи  $\text{км}^2$ ) [8;12]. На водосборе реки Магаданки с использованием топографических карт масштаба в 1:25000 были определены следующие СФК: голыцы; горная тундра на южных склонах; редкий лиственничный лес на северных склонах. В пределах водосбора было выделено 11 РТ. В связи со схожестью природных условий параметры модели были заимствованы из работы [8]. Для верификации модели Гидрограф проводилось непрерывное моделирование гидрографов стока с суточным шагом за период 1971-2015.

Годовой слой стока р. Магаданка составляет в среднем 770 мм, величина испарения на водосборе с учетом прибрежного климата оценивается в величину около 250 мм. Учитывая, что на станции Магадан фиксируется всего 560 мм осадков (невязка составляет около 460 мм), при интерполяции осадков в РТ вводились корректирующие коэффициенты. Результатами расчета стали гидрографы стока и значения элементов водного баланса. Учитывая введенные поправочные коэффициенты, рассчитанный годовой слой стока составил 820 мм. Медианная величина критерия эффективности

Нэша-Сатклиффа (NS) для суточных расходов воды достигает 0,42. В то время как средняя, максимальная и минимальная величина этого критерия равняется 0,2; 0,91 и -1,24. На Рис. 1 приведены результаты моделирования для двух последовательных лет с удовлетворительным и неудовлетворительным результатом моделирования (на основе критерия NS).



**Рис. 1 Суточные рассчитанные и наблюдаемые гидрографы стока: 2004 г. – NS = 0,67; 2005 – NS = -1,85.**

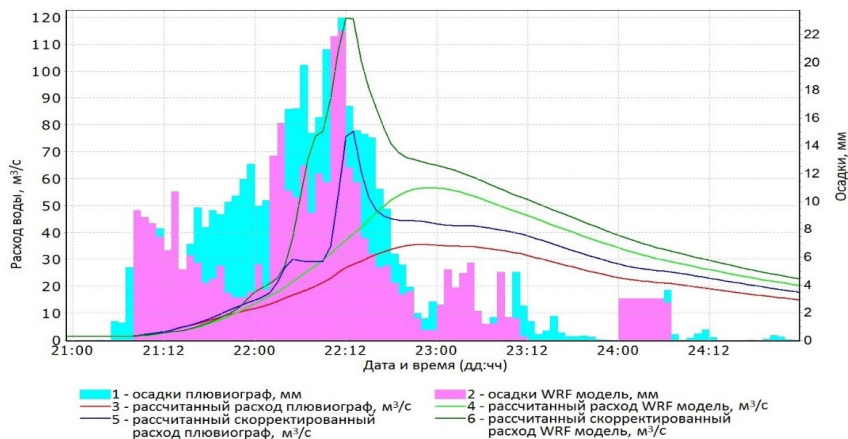
Для 2004 года величина критерия NS составила 0,67, годовые осадки и сток равняются 1300 и 1000 мм, в то время как в 2005 году критерий равен -1,83, годовые осадки и сток – 800 и 600 мм соответственно. Очевидно, что соответствие рассчитанных гидрографов наблюдаемыми в решающей степени зависит от данных об осадках. В некоторые годы данные метеостанции и введенные поправочные коэффициенты являются репрезентативными, в другие же введенные коэффициенты – недостаточны. Результаты показали, что сроки выпадение снега меняются от года к году в широких пределах. Рассчитанные гидрографы за период снеготаяния могут полностью совпадать с данными наблюдений, однако в иные годы могут отличать как во величине, так и по срокам. Для улучшения прогноза стока воды в результате снеготаяния необходимо использовать дополнительную информацию, например, данные снегомерных съемок.

#### **Результаты моделирования паводка 2014 года с часовым шагом**

22-23 июля 2014 в Магадане выпало 196 мм осадков (108 и 88 мм соответственно) при месячной норме июля в 69 мм. Пик паводка на реке Магаданке в районе горнолыжной базы был зарегистрирован 23 июля в 4 часа утра, наблюдаемый уровень воды составил 162 см [2]. Максимальный срочный расход (историческая величина) был оценен по отметкам уровней высоких вод и составил 76,8 м<sup>3</sup>/с, средний суточный расход составил 38,1 м<sup>3</sup>/с. Для расчета катастрофического паводка нами были использованы два типа данных об осадках: 1) детализированная информация с плювиографа с метеорологической станции Магадан; 2) значения осадков для всех РТ по модели WRF. Сумма осадков по плювиографу за период с 21.07 8:30 утра и до 23.07 11:40 составила 268 мм, сумма по климатической модели с 21.07 6:00 и до 24.07 23:00 – 271 мм.

Гидрографы 3 и 4 (Рис. 2) были получены с использованием набора параметров модели, ранее прошедших верификацию. Можно видеть, что максимальный расход для 3 гидрографа (данные WRF) составляет 55,3 м<sup>3</sup>/с, в то время как для 4 гидрографа (данные плювиографов) только 35 м<sup>3</sup>/с. Оба значения не достигают наблюдаемой

величины расхода, но совпадают по времени. В гидрографах 5 и 6 (Рис. 2) вводился поправочный коэффициент 0.3 для параметра инфильтрации почвы. Можно видеть, что форма и сроки гидрографов значительно изменились. Максимальные значения составили 120 и 80 м<sup>3</sup>/с, объем паводка увеличился вдвое, время пика паводка сместилось на 12 ч раньше.



**Рис. 2** Результаты моделирования с часовым шагом по данным плювиографа и климатической модели WRF

### Выводы

В работе оценена возможность применения детерминированной модели с распределенными параметрами Гидрограф для расчета срочных максимальных расходов воды для р. Магаданки в 2014 году. Параметры модели были не откалиброваны, а заимствованы из ранее проведенных исследований. Моделирование стока с суточным шагом проводилось в период с 1971 по 2015 год. Медианное значение NS составляло 0.42 в течение 44 лет. Учитывая отсутствие метеостанции на водосборе, результаты были оценены как удовлетворительные. Для расчета катастрофического паводка использовались два типа данных об осадках: часовые данные плювиографов с метеостанции и результаты расчета по модели WRF. Гидрографы паводков были оценены по исходному и скорректированному наборам параметров. При первоначальном наборе параметров наблюдалось совпадение сроков паводка, но рассчитанное значение расхода было намного ниже наблюдаемого. Мы ввели понижающий поправочный коэффициент в параметр инфильтрации модели, чтобы «повысить» пик паводка и объем гидрографов. Для того, чтобы делать окончательные выводы, в ходе дальнейших исследований предполагается провести коррекцию набора параметров модели. Подробные данные о часовых осадках могут быть использованы для параметризации модели в целях расчета катастрофических паводков. В целом результаты показали, что объединение информации с метеостанции и метеорологической модели WRF может позволить успешно моделировать наводнения в ансамблевом режиме.

## **Благодарности**

Исследование проводилось при поддержке РФФИ (исследовательский проект №19-35-90090).

## **Acknowledgments**

The work was supported by RFBR (grant No 19-35-90090).

## **Список литературы.**

1. Виноградов Ю.Б., Виноградова Т.А. Математическое моделирование в гидрологии. М.: Изд-ий центр «Академия», 2010. 304 с.
2. Министерство природных ресурсов и экологии. Доклад об экологической ситуации в Магаданской области в 2014 году, 2014. 74 с.
3. Макарьева О.М., Виноградова Т.А., Нестерова Н.В., Виноградов А.Ю., Бельдиман И.Н., Колупаева А.Д. Моделирование катастрофических паводков в бассейне р. Туапсе // Геориск. 2018. № 3 (13). С. 78–89.
4. Макарьева О.М., Нестерова Н.В., Виноградова Т.А., Бельдиман И.Н., Колупаева А.Д. Расчет характеристик катастрофических паводков неизученной реки Цемес (г. Новороссийск, Черноморское побережье России) на основе гидрологической модели «Гидрограф» // Вестник СПбГУ. Науки о Земле. 2019. № 1 (64). С. 24–43.
5. Макарьева О.М., Нестерова Н.В., Ямпольский Г.П., Кудымова Е.Ю., Осташов А.А., Колупаева А.Д. Оценка максимальных расходов воды различной обеспеченности неизученной горной реки Хемчик (Республика Тыва) на основе методов математического моделирования // Инженерные изыскания. 2019. № 2 (13). С. 36–51.
6. Ресурсы поверхностных вод СССР: Гидрологическая изученность. Т. 19. Северо-Восток. Л.: Гидрометеоиздат, 1966. 602 с.
7. Chernokulsky A., Kozlov F., Zolina O., Bulygina O., Mokhov I., Semenov V. Observed changes in convective and stratiform precipitation in Northern Eurasia over the last five decades // Environmental Research Letters. 2019. № 14. P. 045001
8. Makarieva O.M., Lebedeva L.S., Vinogradova T.A. Modelling of runoff formation processes at small mountain watersheds in the permafrost zone (by the data of the Kolyma water balance station) // Kriosfera Zemli. 2020. № 1. P. 43–56
9. Makarieva O., Nesterova N., Lebedeva L., Sushansky S., 2018. Water balance and hydrology research in a mountainous permafrost watershed in upland streams of the Kolyma River, Russia: a database from the Kolyma Water-Balance Station, 1948–1997 // Earth System Science Data. 2018. 10. P. 689–710.
10. Semenova O., Lebedeva L., Vinogradov Yu. Simulation of subsurface heat and water dynamics, and runoff generation in mountainous permafrost conditions, in the Upper Kolyma River basin, Russia // Hydrogeology Journal. 2013. № 21(1). P. 107–119.
11. Semenova O., Vinogradov Yu., Vinogradova T., Lebedeva L. (2014) Simulation of Soil Profile Heat Dynamics and their Integration into Hydrologic Modelling in a Permafrost Zone // Permafrost and Periglacial Process. 2014. № 25 (4). P. 257–269.
12. Vinogradov Yu. B., Semenova, O.M., Vinogradova, T.A., 2011. An approach to the scaling problem in hydrological modelling: the deterministic modelling hydrological system // Hydrological processes. 2011. № 25 (7). P. 1055–1073.
13. Skamarock W. C., Klemp J. B., Dudhia J., Gill D. O., Barke, D., Duda M. G., Powers, J. G. 2008: A description of the Advanced Research WRF version. 2008. 113 pp.