

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МАКСИМАЛЬНОГО СТОКА МАЛЫХ РЕК ЗОНЫ МЕРЗЛОТЫ

Н.В. Нестерова^{1,2}, О.М. Макарьева^{1,3}, канд. техн. наук

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

²Государственный гидрологический институт, Санкт-Петербург, Россия

³Институт мерзлотоведения им. М.П. Мельникова Сибирского отделения РАН, Якутск, Россия

MATHEMATICAL MODELING OF MAXIMUM RUNOFF CHARACTERISTICS AT THE SMALL RIVERS IN PERMAFROST ZONES

N.V. Nesterova^{1,2}, O.M. Makarieva^{1,3}

¹St. Petersburg state University, St. Petersburg, Russia

²State Hydrological Institute, St. Petersburg, Russia

³Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, Russia

Рассматривается возможность применения метода детерминированного моделирования для расчета максимальных расходов воды малого водосбора, находящегося в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов. В условиях изменения климата, крайней ограниченности данных наблюдений и, вместе с этим, возрастающим интересом к Арктическим регионам, необходимо понимание гидрологических процессов и развитие методов их моделирования. В ходе исследования был выбран водосбор Колымской водно-балансовой станции, руч. Контактный ($S = 21,3 \text{ км}^2$), и применена гидрологическая модель «Гидрограф». На первом этапе была проведена параметризация и верификация модели на суточном интервале. Результаты моделирования признаны удовлетворительными. Затем на основе детальных данных pluвиограмм ливневых осадков рассчитан катастрофический паводок 2013 года, в результате которого был разрушен гидрологический пост. В связи с этим, максимальный за 70 лет наблюдений расход воды не был измерен. Величина рассчитанного срочного расхода составила $71,5 \text{ м}^3/\text{с}$, в то время, как предыдущий максимальных расход, наблюдающийся в 2005 году, был равен $19,5 \text{ м}^3/\text{с}$. Таким образом, используя данные pluвиографа, мы можем рассчитать срочный расход для решения инженерных задач, когда наблюдения за стоком или отсутствуют, или ошибочны.

The possibility of using the deterministic modeling method to calculate the maximum water discharge of a small catchment, located in the permafrost area, is considered. It is necessary to understand hydrological processes and develop methods for their modeling in the context of climate change, extremely limited observational data and, at the same time, growing interest in the Arctic region. During the study, the Kolyma water-balance station watershed, Kontaktovy creek ($S = 21.3 \text{ km}^2$), was selected and applied hydrological "Hydrograph" model. At the first stage, parameterization and verification of the model at the daily interval was carried out. The simulation results were found to be satisfactory. Then, the catastrophic flood of 2013 was calculated on the basis of detailed precipitation pluviograms data, as a result of which the hydrological gauge was destroyed. In this regard, the maximum water discharge for 70 years of observations has not been measured. The volume of the calculated discharge is $71.5 \text{ m}^3/\text{s}$, at that time, as the previous maximum discharge was observed in 2005 and reach to $19.5 \text{ m}^3/\text{s}$. Thus, using pluviograph data, we can calculate the instant discharges for solving engineering problems when flow observations are absent or erroneous.

Введение.

Согласно принятой в 2014 году стратегии развития арктической зоны (АЗ) Российской Федерации [1] планируется широкомасштабное развитие социально-экономической инфраструктуры Арктики. Среди запланированных проектов 18% занимают транспортные проекты, и они являются приоритетными. Регионы Северо-Востока страны также включены в программу развития Арктики. В 2011 году началось строительство автодороги Колыма – Омсукчан – Омолон – Анадырь.

Ежегодный ущерб от паводков на территории России оценивается примерно в 100 млрд. рублей [2]. Значительная часть ущерба связана с повреждением транспортной инфраструктуры. Учитывая высокую стоимость строительных проектов в Арктике, а также сопредельных территориях Сибири и Дальнего Востока, запланированная Программа требует научно-обоснованных методов расчета характеристик стока рек, прогноза и оценки риска наводнений для промышленной и социальной инфраструктуры. Особенно актуальна данная задача в

условиях изменения климата [3], т.к. арктический регион претерпевает наиболее выраженные климатические изменения.

Целью работы является исследование возможности применения метода детерминированного моделирования для расчета максимальных расходов воды малого водосбора, находящегося в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов.

Объект исследования.

Колымская водно-балансовая станция (КВБС) (Рис. 1) расположена в пределах водосбора руч. Контактного (21.3 км²), относящегося к бассейну р. Колыма, и репрезентативна для условий горных ландшафтов Северо-Востока России. Средняя высота водосбора составляет 1070 м и колеблется от 823 до 1690 м. Станция расположена в зоне распространения сплошной многолетней мерзлоты. Среднегодовая температура на метеостанции Нижняя (850 м) за 1949-1997 гг. составила -11.3°C; годовое количество осадков за тот же период – 342 мм. Основными ландшафтами являются каменные осыпи, заросли кедрового стланика и лиственничное редколесье, заболоченное в долинах ручьев. Подробное описание гидрометеорологических условий формирования стока содержится в работе Макарьевой и др. [4].

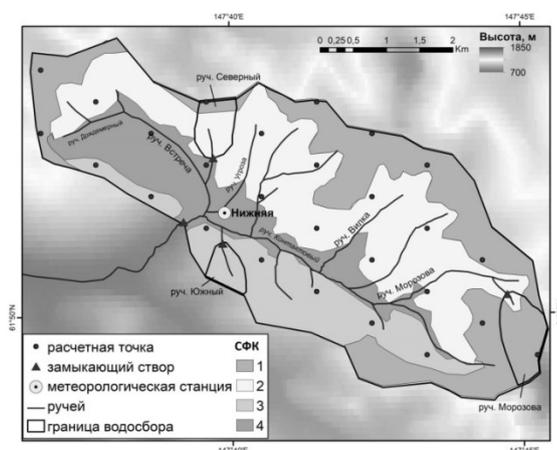


Рис. 1. Объект исследования, руч. Контактный – Нижний. Стокоформирующие комплексы: 1 – каменная осыпь, 2 – горная тундра, 3 - мохово-лишайниковое лиственничное редколесье, 4 – лиственничный лес в долинах рек

Модель «Гидрограф» и параметризация модели.

Для моделирования процессов формирования стока использовалась детерминированная модель «Гидрограф» [5], разработанная профессором Ю.Б. Виноградовым. Модель представляет собой математическую систему с распределенными параметрами и содержит алгоритмы, описывающие динамику тепла и влаги в почвенном профиле в явном виде. Нетребовательность к входной информации (температура и влажность воздуха, осадки) делает ее пригодной к использованию на малоизученных бассейнах. Результатами моделирования является сток воды в замыкающем створе, а также распределенные переменные состояния ландшафтов – характеристики снежного покрова, температура и влажность почвы на разных горизонтах, глубина протаивания и промерзания и др., что позволяет проводить многокритериальную оценку результатов расчетов на их соответствие наблюдаемым процессам и явлениям.

В процессе моделирования водосбор разбивается на стокоформирующие комплексы (СФК) – территории, характеризующиеся условно однородными процессам формирования стока. Водосбор ручья Контактного был разделен на четыре СФК: каменная осыпь, горная тундра, мохово-лишайниковое лиственничное редколесье, лиственничный лес в долинах рек (Рис. 1). Для каждого СФК задаются параметры растительного покрова, профиля почво-грунтов и поверхности склона. Описание параметризации модели для водосборов КВБС представлено в работах [6].

Результаты моделирования процессов формирования стока на суточном интервале.

Непрерывное моделирование стока было произведено для водосбора ручья Контактного – Нижний для периода 1949-1997 гг. В качестве входной информации использовались суточные данные с метеостанции Нижняя (850 м), располагающейся на территории водосбора. При интерполяции осадков и температуры учитывались их высотные градиенты [6].

Результаты расчета водного баланса водосбора приведены в Таблице 1. В процессе верификации модели было произведено сравнение рассчитанных и наблюдаемых гидрографов стока при помощи критерия эффективности Нэша-Сатклиффа. Средние значения данного критерия составили 0,65, достигая максимальной величины 0,87 и минимальной 0,50. Таким образом, результаты моделирования на суточном интервале следует признать удовлетворительными, а модель адекватно описывающей процессы, происходящие на водосборе.

Таблица 1. Водный баланс и значения критериев эффективности Нэша-Сатклиффа (NS), руч. Контактный – Нижний, 1949-1997

Наблюден. стока, мм	Расч. слой стока, мм	Осадки, мм	Испарение, мм	NS (средний)	NS (максимальный, год)	NS (минимальный, год)
286	252	390	115	0,65	0,87 (1963)	0,50 (1958)

Результаты моделирования катастрофического паводка 2013 года.

Паводок 2013 года является самым высоким за исторический период. 20 июня при выпадении более 40 мм осадков интенсивностью 0,87 мм/мин сформирован катастрофический расход воды, в результате прохождения которого был разрушен гидрологический пост, а сам максимальный за 70 лет инструментальных наблюдений, расход не был измерен.

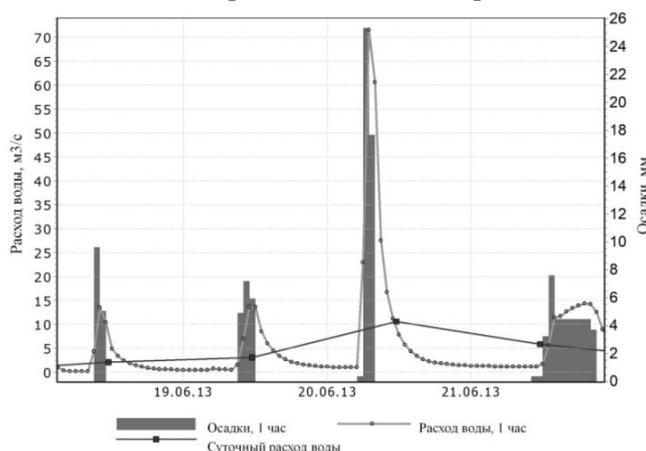


Рис. 2. Рассчитанные 1-часовой и суточный гидрографы стока и 1-часовые осадки, 19-21 июня 2013

Результат моделирования данного паводка при использовании суточных метеорологических данных показал, что рассчитанное значение, равное 8,13 м³/с (Рис. 2), примерно совпадает с наблюдаемым в 2005 году максимальным расходом, достигающим 8,15 м³/с. Тем не менее, паводок 2013 года, по показаниям очевидцев и снесенному гидрологическому посту, был значительно мощнее ранее наблюдавшегося паводка.

Для расчета максимального расхода воды 2013 года были использованы подробные данные плювиограмм ливневых осадков, которые были получены из метеорологических ежегодников. Использование данных плювиографов помогает описать осадки высокой интенсивности, в результате выпадения которых формируются пиковые расходы воды. Величина рассчитанного срочного расхода составила 71,5 м³/с (Рис. 2), в то время как максимальный измеренный расход

2005 года был равен $19,5 \text{ м}^3/\text{с}$. Сравнение суточных величин при моделировании с данными плувиографов показал, что рассчитанное значение на 22% превышает наблюдаемое ранее.

Таким образом, значение 2013 года резко меняет кривую обеспеченностей, используемую в инженерных задачах. В условиях ограниченности данных наблюдений в регионе восстановление отсутствующих или ошибочных данных играет важную роль в проектировании и строительстве.

Выводы.

Для оценки максимального паводочного расхода 2013 года была применена детерминированная модель формирования стока «Гидрограф». Оценены основные параметры модели и проведена верификация модели на водосборе руч. Контактного – Нижний при использовании исторических данных наблюдений за период 1949-1997 гг. Результаты моделирования приняты удовлетворительными.

При моделировании гидрографа стока катастрофического паводка 2013 г. были использованы данные плувиограмм ливневых осадков близлежащей метеорологической станции. Максимальное рассчитанное значение расхода воды составило $71,5 \text{ м}^3/\text{с}$, что превышает наблюдаемый максимальный расход 2005 года более чем в 3 раза.

В ходе работы были сделаны следующие выводы:

1. Стандартная метеорологическая информация, доступная в России, не подходит для моделирования экстремальных паводков, вызванных ливневыми осадками.
2. Результаты суточного моделирования являются удовлетворительными без экстремальных ситуаций.
3. Данные плувиографа могут быть использованы для анализа катастрофических наводнений.
4. Используя данные плувиографа, мы можем рассчитывать срочный расход для решения инженерных задач, когда наблюдения за стоком или отсутствуют или ошибочны.

Ограниченные возможности применения методов стандартных гидрологических расчетов в связи с изменением климата и гидрологического режима ставят задачу разработки новых подходов для получения максимальных характеристик стока. Одним из вариантов такого подхода может стать продемонстрированный в работе метод детерминированного моделирования.

Литература

1. Государственная программа Российской Федерации «Социально-экономическое развитие Арктической зоны Российской Федерации», утверждена постановлением Правительства Российской Федерации от 21 апреля 2014 г. № 366 (в редакции постановления Правительства Российской Федерации от 31 августа 2017 г. № 1064). URL: <http://static.government.ru/media/files/GGu3GTv8bvV8gZxSEAS1R7XmzloK6ar.pdf>, (дата обращения 19.04.2017).
2. Ляпичев Ю.П. Гидрологическая и техническая безопасность гидросооружений: Учебное пособие // М.: РУДН. 2008.
3. Шевнина Е. В. Долгосрочная оценка статистических характеристик максимального слоя на территории российской Арктики: диссертация ... доктора технических наук // Шевнина Елена Валентиновна. Санкт-Петербург. Российский государственный гидрометеорологический университет. 2015.
4. Makarieva, O., Nesterova, N., Lebedeva, L., and 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 Syst. Sci. Data, 10, 689-710, <https://doi.org/10.5194/essd-10-689-2018>, 2018.
5. Виноградов, Ю.Б., Виноградова, Т.А. Математическое моделирование в гидрологии. М.: Академия, 2010.
6. Лебедева Л.С., Семенова О.М., Виноградова Т.А. Расчет глубины сезонно-талого слоя в условиях различных ландшафтов Колымской водно-балансовой станции в задаче гидрологического моделирования. Часть 2 // Криосфера Земли 19 (2), 2015. – С.35–44.