

## ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ МАКСИМАЛЬНОГО СТОКА ВЕСЕННЕГО ПОЛОВОДЬЯ РЕК РОССИЙСКОЙ ЧАСТИ БАСЕЙНА ФИНСКОГО ЗАЛИВА

Л.С. Курочкина<sup>1</sup>, С.А. Журавлев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Государственный гидрологический институт, Санкт-Петербург, Россия

## SPATIOTEMPORAL VARIABILITY OF THE MAXIMUM SPRING RUNOFF FOR THE RUSSIAN PART OF THE GULF OF FINLAND BASIN

L.S. Kurochkina<sup>1</sup>, S.A. Zhuravlev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>State Hydrological Institute, St. Petersburg, Russia

*За последние десятилетия в пределах бассейна Балтийского моря отмечаются значительные климатообусловленные изменения речного стока и его внутригодового распределения. Несмотря на значительное количество публикаций, посвященных вопросам изменения характеристик речного стока, сохраняется потребность в подробных исследованиях, нацеленных на выявление причин этих изменений и их прогнозов на долговременную перспективу. В работе проведена оценка уже произошедших изменений максимального стока весеннего половодья рек российской части бассейна Финского залива, а также вероятностный прогноз будущих изменений максимального стока для водосбора (р. Тихвинка), расположенного в пределах исследуемой территории. Было установлено, что тенденции изменения максимальных расходов воды весеннего половодья для водосборов малых и средних рек, расположенных в пределах бассейна рек Невы, Нарвы, Луги, имеют разнонаправленный характер с преобладанием трендов на их снижение. Наиболее существенное уменьшение наблюдается в бассейне рек Нарвы и Луги (до 10% за 10 лет). В пределах водосборов Ладожского и Онежского озера значимые тренды на изменение максимальных расходов воды весеннего половодья не зафиксированы. Ожидаемые изменения климата задавались по данным ансамбля региональных моделей климата с высоким пространственным разрешением, которые предоставляет проект EURO-CORDEX. Моделирование стока для р. Тихвинки проводилось с помощью модели «Гидрограф». Показано, что для расчетных климатических сценариев снижение пиков весеннего половодья будет продолжаться.*

*Over the past few decades, significant climate-related changes in river runoff and its intra-annual distribution have been observed within the Baltic Sea basin. Despite a significant number of publications devoted to the issues of river runoff changes, there is a need for the detailed regional studies aimed at identifying the causes of these changes and their long-term forecasts. The assessment of the changes occurred in the maximum spring runoff for the Russian part of the Gulf of Finland basin was carried out in the study, as well as the probabilistic forecast of future changes in the maximum runoff was conducted for the catchment (Tikhvinka) located within the study area. Trend analysis over the entire period shows that there are positive and negative trends of peak runoff over the study area. The majority of the basins in our study showed negative trends in maximum discharge. Negative trends detected for western and south-western parts of the area that includes Narva and Luga river basins. Upward trends occur on the north-eastern parts. The expected climate changes were set according to the ensemble of regional climate models with high spatial resolution, provided by the EURO-CORDEX project. Modelling of streamflow was carried out applying the model named "Hydrograph". It is shown that the maximum spring flood discharges are expected to decrease.*

### **Введение.**

Оценка максимального стока на перспективу по данным многолетних наблюдений является одной из актуальных проблем гидрологии. На протяжении XX века разрабатывались методики расчета гидрологических характеристик, основанные на изучении закономерностей многолетних колебаний стока при условии стационарности климата в прошлом и будущем. Однако в настоящее время правомерность применения данных методик ставится под сомнение в связи с климатическими изменениями, вызванными процессами изменения климата. [1]

Происходящие изменения климата уже привели к изменениям максимального стока рек. Согласно ряду исследований [2, 3, 4], проведенных в странах Балтийского региона, максимальные расходы воды весеннего половодья уменьшились для большей части территории бассейна Балтийского моря. Предполагается, что основными причинами изменений максимального стока в бассейне Балтийского моря являются, с одной стороны, увеличение сумм зимних осадков, а с другой — смягчение климата в зимний период и повышение частоты зимних оттепелей.

Большинство выполненных ранее исследований основываются на данных наблюдений, ограниченных 2000-2001 гг. Начало XXI века (2000-2013 гг.) в пределах бассейна Балтийского моря характеризовалось пониженными значениями средней температуры воздуха за зимний период относительно конца XX века. Это требует проведения нового анализа трендов максимальных расходов воды и факторов, их обуславливающих.

В данной работе представлены результаты оценок произошедших изменений максимального стока рек российской части бассейна Финского залива, а также результаты оценки ожидаемых изменений на примере реки Тихвинки.

#### **Материалы и методы.**

Для оценки произошедших изменений максимального стока рек весеннего половодья были отобраны 70 гидрологических постов, расположенных на малых и средних незарегулированных реках российской части бассейна Финского залива Балтийского моря за период 1946-2013 гг. Для выявления причин изменений в максимальном стоке рек были выбраны метеорологические предикторы, которые, предположительно, определяют максимальный сток весеннего половодья - это средние суточные температуры, суммы осадков за зимние месяцы и запасы воды в снегу. Оценка трендов метеопредикторов проводилась по данным 25 метеорологических станций за период 1946-2013 гг. В качестве источника данных использовался архив ВНИИГМИ-МЦД. Значимость трендов оценивалась с помощью непараметрического теста Манна-Кендалла [5, 6]. Оценка тренда проводилась методом Сена [7].

Оценка возможных изменений речного стока была проведена для створа р. Тихвинка – д. Горелуха ( $F=2070$  км<sup>2</sup>). В качестве основы для моделирования стока рек была принята моделирующая система «Гидрограф», разработанная в Государственном гидрологическом институте под руководством Ю.Б. Виноградова [8]. Модель ориентирована на простейшую сетевую метеорологическую информацию: температура и дефицит влажности воздуха, слой осадков с суточным разрешением. Выход модели – непрерывные гидрографы стока с суточным шагом для замыкающего створа в течение необходимого ряда лет. Пространственная структура водосбора описывается наборами почвенных и ландшафтных параметров, обобщаемых в пределах стокоформирующих комплексов (СФК).

Исходными метеорологическими данными для р. Тихвинки послужили данные суточных наблюдений 3-х метеостанций (Тихвин, Ефимовская, Бабаево) с 1965-2012 гг. Дефицит влажности воздуха определялся как функция от температуры отдельно для дней с осадками и без них. В качестве контрольной гидрологической информации использовались данные о суточных расходах воды для гидрологического поста на р. Тихвинка - д. Горелуха за 1966 – 2012 гг.

Анализ будущих изменений климата для бассейна реки Тихвинки был выполнен на основе данных климатического моделирования консорциума EURO-CORDEX. Модельные оценки ожидаемых изменений стока проводились методом дельт для месячных величин температуры воздуха и количества осадков, рассчитанных по ансамблю глобальных и региональных климатических моделей для сценариев радиационного воздействия семейства RCP. Метод дельт заключается в трансформации исходных метеорологических рядов путем прибавления к ним отклонений температуры воздуха в градусах Цельсия и количества осадков в процентах от исторического периода.

#### **Результаты и обсуждение.**

Для 50 постов (71% от общего числа) установлено наличие отрицательного тренда максимальных расходов воды весеннего половодья, при этом только для 15 постов (21%) тренд является статистически значимым. Большинство из них расположены в бассейнах рек Нарвы и Луги. В среднем для российской части бассейна Финского залива линейный тренд составляет 2%/10 лет.

Анализ средних суточных температур воздуха за зимние месяцы показал преобладание значимых трендов на повышение количества оттепелей и сумм положительных температур за зимний период для всей рассматриваемой территории. При этом наивысшие тренды сумм положительных температур (до 4,2°/10 лет) отмечены для юга и юго-запада, а наименьшие (0,2-1°/10 лет) — для северо-востока бассейна р. Невы.

Суммы зимних осадков характеризуются восходящими трендами, которые в среднем составляют 5,2 мм/10 лет для твердых и 0,9 мм/10 лет для жидких осадков. Тесная связь поля трендов стока была выявлена для жидких осадков и слабая связь для твердых осадков.

Оценка качества моделирования стока р. Тихвинки проводилась по критерию NSE. Среднее значение критерия NS для р. Тихвинки составило 0,68, что позволяет оценить качество моделирования как удовлетворительное [9].

Анализ будущих изменений климата для бассейна реки Тихвинки был выполнен на основе данных климатического моделирования консорциума EURO-CORDEX. В своих расчетах EURO-CORDEX использует репрезентативные траектории концентраций (сценарии концентраций) парниковых газов семейства RCP. В работе представлены расчеты по сценариям RCP2.6, RCP4.5 и RCP8.5. Пространственное разрешение данных составляет 0,11° (~12,5 км). Для оценки будущих изменений температуры воздуха и осадков были использованы расчеты по 5 комбинациям глобальных климатических моделей с одной региональной моделью (таблица 1). В качестве обобщающей величины по ансамблю глобальных и региональных моделей использовалось значение медианы.

Таблица 1. Список глобальных и региональных климатических моделей, а также сценариев концентраций парниковых газов, использованных в исследовании

	RCP2.6	RCP4.5, RCP8.5
Глобальные модели	MOHC-HadGEM2-ES ICHEC-EC-EARTH MPI-M-MPI-ESM-LR	MOHC-HadGEM2-ES ICHEC-EC-EARTH MPI-M-MPI-ESM-LR CNRM-CERFACS-CNRM-CM5 IPSL-IPSL-CM5A-MR
Региональные модели	SMHI-RCA4	SMHI-RCA4

Отклонения сезонных температур воздуха ожидаются преимущественно положительными, причем наибольшее увеличение температуры отмечается для зимнего периода (рис. 1). Весенний и летний сезоны характеризуется более низкими значениями отклонений в пределах 2,0-4,0°С к концу столетия.

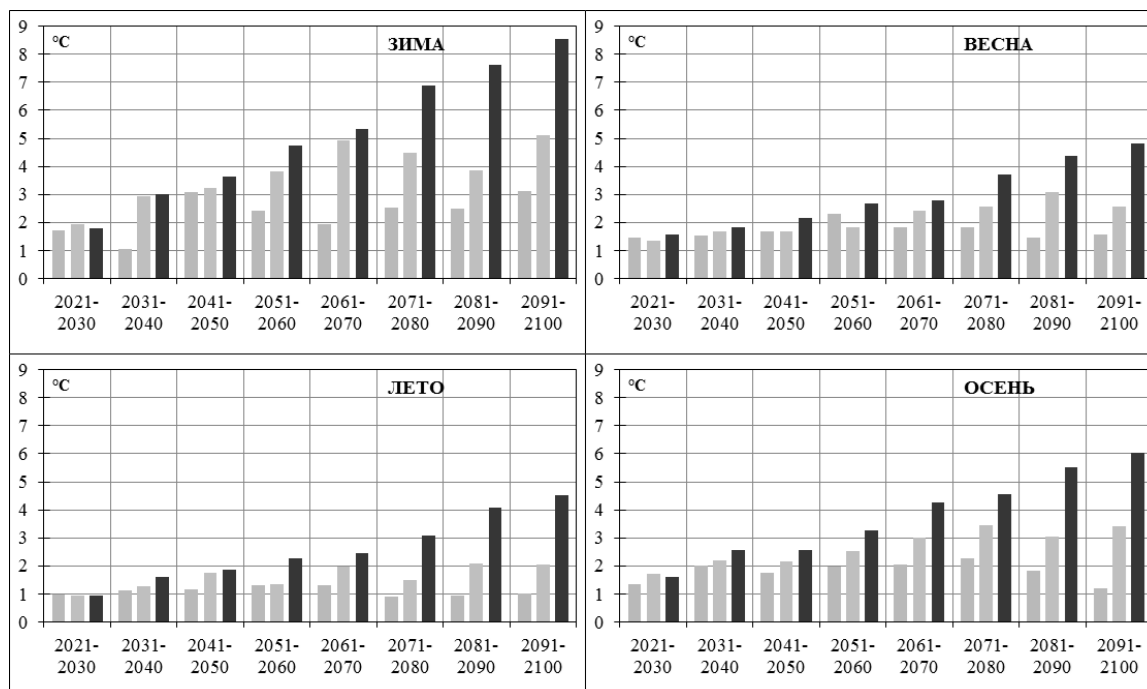


Рис. 1. Отклонения сезонной температуры воздуха от исторического периода для 3-х сценариев радиационного воздействия RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5

Распределение отклонений сумм осадков по сезонам характеризуется наибольшими значениями также в зимний период. Осадки теплого периода по всем сценариям радиационного воздействия прогнозируются с большой неопределенностью.

Расчеты ожидаемых изменений максимального стока весеннего половодья р. Тихвинки у д. Горелуха проводились по десятилетиям с 2021 по 2100 годы и сравнивались с нормой стока, рассчитанной за базовый период с 1971 по 2000 годы. Для рассчитанных значений стока производилась байес-коррекция.

Максимальные расходы воды весеннего половодья оказались ниже нормы (в среднем на 26% для RCP2.6, 34% для RCP4.5 и 37% для RCP8.5) (рис. 2). Для сценария RCP8.5 отмечается заметный тренд на уменьшение максимального стока к концу столетия.

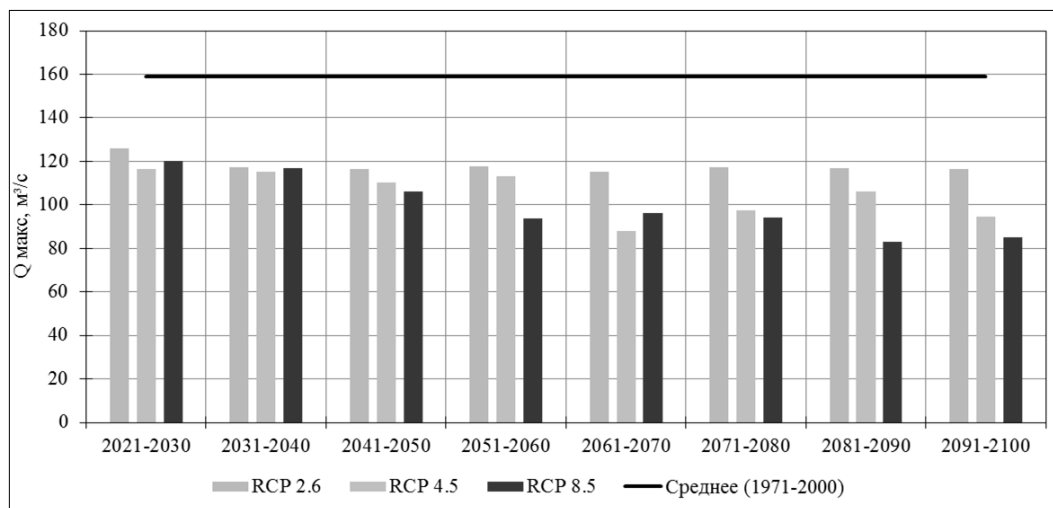


Рис. 2. Ожидаемые изменения максимального стока весеннего половодья р. Тихвинки (д. Горелуха) за период 2021-2100 гг по отношению к базовому периоду

Оценка значимости изменений климатических переменных по отношению к естественным колебаниям гидрологических характеристик проводилась с помощью критерия SNR. Для максимальных расходов воды значение SNR варьируется в пределах 0,5-1,2, причем для сценариев RCP4.5 и 8.5 отмечается тенденция к их увеличению к концу столетия. Это говорит о том, что прогнозируемые изменения климата с большей степенью вероятности приведут к уменьшению максимального стока к концу столетия.

## Литература

1. Водные ресурсы России и их использование // Под ред. И.А. Шикломанова. СПб.: ГГИ, 2008. 600 с.
2. Lindström G. and Bergström S. Runoff trends in Sweden 1807–2002 // Hydrol. Sciences, 2004, vol. 49, № 1, pp. 69-83.
3. Korhonen J. and Kuusisto E. Long-term changes in the discharge regime in Finland // Hydrology Res., 2010, vol. 41, № 3-4, pp. 253-268.
4. Sarauskiene D. et al. Flood pattern changes in the rivers of the Baltic countries // Environ. Eng. and Landscape Management, 2015, 23.1, pp. 28-38.
5. Mann H. B. Nonparametric tests against trend. — Econometrica, 1945, No. 13, pp. 245-259.
6. Kendall M. G. and Gibbons J. D. Rank Correlation Methods. — London, Griffin, 1990.
7. Sen P. K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. — J. Amer. Statistical Association, 1968, vol. 63, No. 324, pp. 1379-1389.
8. Vinogradov, Yu B., O. M. Semenova, and T. A. Vinogradova. "An approach to the scaling problem in hydrological modelling: the deterministic modelling hydrological system." Hydrological processes 25.7 (2011): 1055-1073.
9. Moriasi, Daniel N., et al. "Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria." Transactions of the ASABE 58.6 (2015): 1763-1785

*Работа выполнена при поддержке гранта РГО-РФФИ 17-05-41118 РГО\_a.*

*This work was supported by the grant from the RGO-RFBR 17-05-41118 RGO\_a.*