

ЛИТЕРАТУРА

- [1]Gafurov, A., Lüdtke, S., Unger-Shayesteh, K., Vorogushyn, S., Schöne, T., Schmidt, S., Kalashnikova, O., and Merz, B.: MODSNOWTool: an operational tool for daily snow cover monitoring using MODIS data, *Environmental Earth Sciences*, 75, 1-15, 10.1007/s12665-016-5869-x, 2016.
- [2]Gafurov, A., and Bárdossy, A.: Cloud removal methodology from MODIS snow cover product, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 13, 1361-1373, 2009.
- [3]Hall, D. K., V. V. Salomonson, and G. A. Riggs. 2006. *MODIS/Terra Snow Cover Daily L3 Global 500m Grid, Version 5*. Boulder, Colorado USA. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. doi: <http://dx.doi.org/10.5067/63NQASRDPDB0>.
- [4]Hall, D. K. and G. A. Riggs. 2016. *MODIS/Terra Snow Cover Daily L3 Global 500m Grid, Version 6*. Boulder, Colorado USA. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. doi: <http://dx.doi.org/10.5067/MODIS/MOD10A1.006>.
- [5]Hall D, Riggs G, Foster J, Kumar S (2010) Development and evaluation of a cloud-gap-filled MODIS daily snow-cover product. *Remote Sens Environ* 114:496–503
- [6]Parajka J, Bloeschl G (2008a) Spatio-temporal combination of MODIS images—potential for snow cover mapping. *Water Resour Res* 44:1–13

Глава II/88: ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ В ЛЕДНИКОВЫХ БАССЕЙНАХ Р.ТАРИМ, ЦЕНТРАЛЬНАЯ АЗИЯ: НАБЛЮДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ РАСХОДОВ ВОДЫ И ОЦЕНКА БУДУЩИХ ИЗМЕНЕНИЙ

Chapter II/88: Hydrological Change in Glacier Covered Headwater Catchments of the Tarim River,
Central Asia: Observed Streamflow Changes and Future Projections

Doris Duethmann^{*1,2}, Sergiy Vorogushyn¹, Daniel Farinotti^{1,3,4}, Christoph Menz⁵, Bruno Merz¹,
David Kriegel^{1,6}, Tobias Bolch^{7,8}, Tino Pieczonka⁷, Tong Jiang^{9,10}, Buda Su^{9,10,11}, Andreas Güntner¹
DOI 10.25680/6851.2018.53.99.185

*Email: duethmann@hydro.tuwien.ac.at

- 1.GFZ German Research Centre for Geosciences, Section Hydrology, Potsdam, Germany
- 2.Institute of Hydraulic Engineering and Water Resources Management, Vienna University of Technology, Vienna, Austria
- 3.Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology (VAW), ETH Zurich, 8093 Zurich, Switzerland
- 4.Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research WSL, Birmensdorf, Switzerland
- 5.Potsdam Institute for Climate Impact Research, Telegrafenberg, Potsdam, Germany
- 6.IBGW GmbH, Leipzig, Germany
- 7.Technische Universität Dresden, Institute for Cartography, Dresden, Germany
- 8.University of Zurich, Department of Geography, Zurich, Switzerland
- 9.National Climate Centre, China Meteorological Administration, Beijing, China;
- 10.Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, People's Republic of China
- 11.University of Information Science & Technology, Nanjing, China; Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Science, Urumqi, China

РЕЗЮМЕ. Целью данного исследования является анализ наблюдаемых изменений стока в двух горно-ледниковых бассейнов р. Тарима на северо-западе Китая за последние 50 лет, а также оценка возможных будущих изменений ледников и водного баланса, вызванные изменением климата. Для этой цели использовалась гидрологическая модель. Чтобы повысить надежность результатов, модель была откалибрована многоцелевым методом на основе ежедневных данных расходов воды, долгосрочных трендах и балансе массы ледников. Результаты показывают, что увеличение расходов за последние 50 лет во многом связано с увеличением температуры и связанным с этим усилением таяния ледников. Моделирование по климатическим сценариям показывает сперва дальнейшее увеличение талого стока связанного с повышением температуры в XXI веке, однако в дальнейшем с уменьшением ледниковой массы, результаты указывают на значительное снижение ледникового стока. Вместе с увеличением испарения это приводит к уменьшению общего расхода в 2070-2099 гг. по сравнению с 1971-2000 гг.

Abstract. This study aims at improving our understanding of observed runoff changes in two glacier covered headwater catchments of the Tarim River in north-west China over the last 50 years, as well as at assessing possible future changes of glaciers and the water balance due to climate change. To this end, we applied an approach based on hydrological modeling. In order to increase the robustness of the results, the model was calibrated in a multi-objective way using daily runoff data, long-term runoff trends, and glacier mass balance data. The results show that the runoff increase over the last 50 years is to a large extent due to an increase in air temperature and an associated increase in glacier melt. Simulations with climate scenarios indicate a further temperature-induced increase of glacier melt in the beginning of the 21st century, but then glacier melt declines due to decreasing glacier areas. Decreasing glacier melt and increasing evapotranspiration result, despite projected increases in precipitation, in decreases of total discharge in 2070-2099 compared to 1971-2000.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: гидрологическое моделирование, многоцелевая калибровка, ледники, изменение климата, выяснение причин трендов, Тянь-Шань

Key words: hydrological modeling, multi-objective calibration, glaciers, climate change, trend attribution, Tien Shan

ВВЕДЕНИЕ

Горные регионы Центральной Азии играют важную роль в водоснабжении низлежащих полузасушливых и засушливых территорий. В результате глобального потепления в этих районах, которые характеризуются наличием снегозапасов и ледников, можно ожидать больших изменений в водном балансе. Значительные изменения уже можно увидеть в некоторых областях. Таким образом, расходы воды в двух важных горно-ледниковых бассейнах Тарима за период 1957-2004 гг. увеличился на 30%. Возникает вопрос, в какой степени этот подъем обусловлен увеличением таяния ледников. Дальнейший вопрос, который важен для управления водными ресурсами и землепользованием, заключается в том, как будущий отток будет продолжать изменяться под воздействием изменения климата.

Гидрологические модели являются важным инструментом для исследования таких вопросов. Однако использование гидрологических моделей в горных районах Центральной Азии связано с высокой неопределенностью из-за низкой плотности данных. Чтобы повысить надежность моделирования, мы используем метод многомерной и многоцелевой калибровки модели. В этой статье мы сперва представляем гидрологическую модель и подход к ее калибровке. Модель применяется в двух горно-ледниковых бассейнах Тарима для количественной оценки водного баланса, изучения причин изменений в стоке в прошлом и прогнозирования возможных будущих изменений в связи с изменением климата.

ОБЛАСТЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Область исследования состоит из двух горных бассейнов р. Аксу, которая является самым большим притоком Тарима. Первый бассейн Какшаал имеет площадь 18 000 км² и оледенение 4% (по состоянию на 2008 год) и бассейн Сари-Джаза включает площадь 13000 км² и площадь ледников составляет 20% (рисунок 1).

ГИДРОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И ПОДХОД К КАЛИБРОВКЕ МОДЕЛИ

Для гидрологического моделирования использовалась полураспределенная модель WASA [1]. Пространственная дискретизация модели основана на разделении бассейна на суббассейны и высотные зоны. Модель вычисляет рассчитывает снеготалый и ледниковый сток, эвапотранспирацию, инфильтрацию, а также поверхностный, промежуточный сток и сток грунтовых вод. Из-за неопределенности в данных об осадках модель содержит коэффициент коррекции осадков, который определяется путем калибровки [2]. Динамические изменения толщи и площади ледников учитываются в модели с помощью особой параметризации [3]. Изменения площадей ледникового покрова в течение периода наблюдения были получены на основе двух инвентаризаций [4].

Модель была откалибрована используя данные стока, так и данные баланса массы. Для стока учитывались суточные вариации стока, межгодовые колебания сезонного стока и долгосрочные тенденции стока. Для баланса массы ледников были использованы два критерия: совокупное изменение массы ледников в течение периода калибровки было откалибровано с использованием двух геодезических балансов масс ледников. Временные изменения в моделированном балансе массы

оценивались с использованием корреляции с измеренным ежегодным временным рядом баланса массы ледника, находящимся в непосредственной близости от исследуемого региона. Подробное описание модели и подход к калибровке можно найти в [5].

ВЫЯСНЕНИЕ ПРИЧИН ТРЕНДОВ

Для выяснения причин тренда были проведены симуляции с неизмененными временными рядами температур и осадков, а также с рядами, в которых тренды были удалены. Исходя из этого можно определить долю наблюдаемого тренда за счет увеличения количества осадков или повышения температуры и увеличения таяния ледников.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СЦЕНАРИЕВ

Ансамбль состоящий из трех сценариев выбросов, девяти климатических моделей и нескольких параметризаций гидрологической модели был использован для прогнозирования будущих изменений ледников и водного баланса. Это позволило оценить неопределенность результатов. Глобальные климатические модели были выбраны таким образом, что они охватили 90% диапазона осадков и температурных изменений всех моделей CMIP5 (Climate Model Intercomparison Project [6]). Для коррекции смещения использовался подход корректировки квантилей [7].



Рисунок 1 – Горные бассейны Аксу: Какшаал и Сари-Джаз.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Количественная оценка водного баланса: откалиброванная модель позволяет количественно оценить водный баланс региона. Среднегодовые осадки в регионе оцененные по откалиброванному поправочному коэффициенту составили 400-450 мм/год. Диапазон неопределенности обусловлен неопределенностью параметров гидрологической модели. Испарение рассчитанное по модели составило 250-260 мм/год. Расчетный ледниковый сток составляет 65-100 мм/год по отношению к общей исследуемой площади бассейнов. Если пренебречь потерями на испарения с ледникового стока, то средний вклад ледниковой составляющей в период 1957-2004 гг составил 27-37%.

Объяснение причин трендов: из сопоставления симуляций с неизмененными рядами осадков и температурными и с рядами, в которых тренды были откорректированы, а также с учетом и без учета изменений площадей и толщины ледников увеличение стока в период 1957-2004 гг. обусловлено главным образом повышением температуры и связанным с этим увеличением таяния ледников (Рис. 2). Примерно одна треть увеличения стока также обусловлена увеличением количества осадков за этот период.

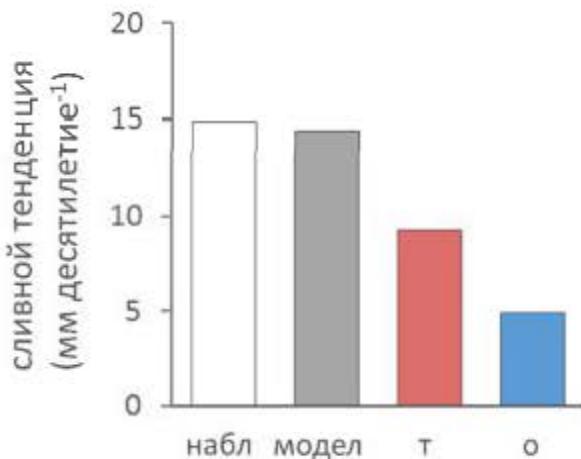


Рисунок 2 – Моделированная и наблюдаемая тенденция стока в горных бассейнах Аксу за период 1957-2004 гг, а также доля изменений температуры (т) и осадков (о) объясняющих эту тенденцию.

Влияние изменения климата на площадь оледенения и сток:

В начале XXI века в оценках изменения наблюдается повышенный ледниковый сток обусловленный повышением температуры и более интенсивным таянием ледников. Однако в течение XXI столетия ледниковый сток заметно уменьшается в результате уменьшения площадей оледенения (рис. 3). В конце столетия результаты модели демонстрируют резкое снижение ледниковых площадей в горных районах Аксу на 32-90% (по сравнению с 2008 годом) [8]. Представленный диапазон неопределенности включает 5-95% ансамбля. В результате ледниковый сток в период 2070-2099 гг. на 72-86% ниже чем в базовом периоде 1971-2000 гг. Поскольку увеличение количества осадков не может компенсировать увеличение испарения и снижение таяния ледников, результаты модели показывают уменьшение общего стока на 1-20% по сравнению с контрольным периодом в период около 2080 года (рисунок 3).

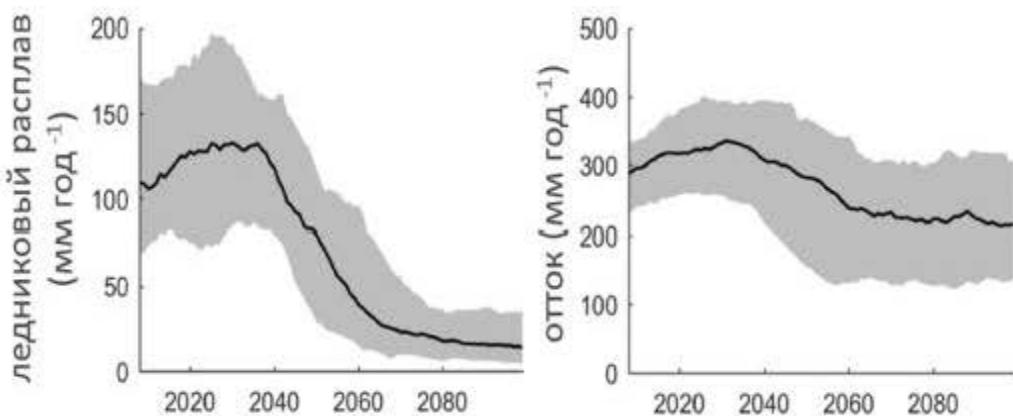


Рисунок 3 – Оценка таяния ледников (слева) и общего расхода (справа) в течение XXI века в исследуемом регионе. Показаны 10-летние скользящие средние значения медианной кривой (черная кривая) и диапазон неопределенности 5-95% (серый оттенок) ансамбля.

ОБСУЖДЕНИЕ

Сильное влияние повышения температуры на наблюдаемый тренд стока показывает, что увеличение общих расходов воды во многом связано с уменьшением ледниковых запасов. Поэтому в долгосрочной перспективе следует ожидать, что этот дополнительный ледниковый сток будет иссякать с уменьшением оледенения. Эта картина вырисовывается из оценки климатических сценариев, которая показывает снижение общего объема расходов на конец века.

Прогнозы показывают большую степень неопределенности, вызванную неопределенностью в сценариях выбросов, глобальных климатических моделях и параметрах гидрологической модели (рис. 3). Слабое пространственное разрешение глобальных климатических моделей, которое неадекватно отражает топографию области исследования, что в результате требует коррекции смещения кли-

матических рядов, создает дополнительную неопределенность. В случае ледниково-гидрологической модели неопределенности заключаются во входных и калибровочных данных, а также в структуре модели. К примеру, неопределенность в оценке исходных толщ ледников оценивается примерно в 30% [9]. Существуют открытые вопросы, касающиеся влияния изменений обломочного покрытия ледников или влияния изменений растительности на водный баланс. Представленные результаты имеют большое значение для управления землепользованием и водными ресурсами. Несмотря на существующую неопределенность в сценариях, рекомендуется учитывать возможное сокращение водных ресурсов из горных районов для долгосрочного планирования в области землепользования и управления водными ресурсами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Гидрологические модели являются полезным инструментом для количественной оценки и водного баланса и его изменений.
2. Путем интеграции как можно большего объема данных для калибровки модели (суточные данные расходов, долгосрочные тенденции стока, балансы массы ледников) неопределенности в гидрологическом моделировании могут быть уменьшены.
3. Применение модели показывает, что увеличение стока с двух горно-ледниковых горных бассейнов Тарима за последние 50 лет в значительной степени объясняется увеличением таяния ледников.
4. Расчеты по сценариям показывают явное снижение площадей ледников в XXI веке. За счет повышения эвапотранспирации и уменьшенного ледникового стока к концу XXI века следует ожидать уменьшения общего расходы воды в верховьях Аксу по сравнению с контрольным периодом (1971-2000 гг.).

ЛИТЕРАТУРА

- [1]Güntner, A., and Bronstert, A., 2004. Representation of landscape variability and lateral redistribution processes for large-scale hydrological modelling in semi-arid areas. *J. Hydrol.* 297, 1-4, 136-161.
- [2]Duethmann, D., Zimmer, J., Gafurov, A., Güntner, A., Kriegel, D., Merz, B., and Vorogushyn, S., 2013. Evaluation of areal precipitation estimates based on downscaled reanalysis and station data by hydrological modelling. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 17, 7, 2415-2434.
- [3]Huss, M., Jouvet, G., Farinotti, D., and Bauder, A., 2010. Future high-mountain hydrology: A new parameterization of glacier retreat. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 14, 5, 815-829.
- [4]Pieczonka, T., and Bolch, T., 2015. Region-wide glacier mass budgets and area changes for the Central Tien Shan between ~1975 and 1999 using Hexagon KH-9 imagery. *Glob. Planet. Change* 128, 1-13.
- [5]Duethmann, D., Bolch, T., Farinotti, D., Kriegel, D., Vorogushyn, S., Merz, B., Pieczonka, T., Jiang, T., Su, B., and Güntner, A., 2015. Attribution of streamflow trends in snow- and glacier melt dominated catchments of the Tarim River, Central Asia. *Water Resour. Res.* 51, 6, 24.
- [6]Taylor, K. E., Stouffer, R. J., and Meehl, G. A., 2012. An overview of CMIP5 and the experiment design. *B. Am. Meteorol. Soc.* 93, 4, 485-498.
- [7]Gudmundsson, L., Bremnes, J. B., Haugen, J. E., and Engen-Skaugen, T., 2012. Technical Note: Downscaling RCM precipitation to the station scale using statistical transformations - a comparison of methods. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 16, 9, 3383-3390.
- [8]Duethmann, D., Menz, C., Jiang, T., and Vorogushyn, S., 2016. Projections for headwater catchments of the Tarim River reveal glacier retreat and decreasing surface water availability but uncertainties are large. *Environ. Res. Lett.* 11, 5, 054024.
- [9]Huss, M., Zemp, M., Joerg, P. C., and Salzmann, N., 2014. High uncertainty in 21st century runoff projections from glacierized basins. *J. Hydrol.* 510, 35-48.