

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДЕЛИ WEAP ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА НА ПОТРЕБНОСТЬ В ВОДНЫХ РЕСУРСАХ РЕК СЫРДАРЬИ И АМУДАРЬИ

*М. Пункари, Х. Ибрагимов, А. Каримов  
(Финская Консалтинговая группа, IWMI)*

*The goal of this research is a development, calibration and evaluation of the hydrological model for the lower reach of the Amudarya and Syrdarya rivers, which also includes different scenarios of the assessment of the impact of climate change on water availability. These rivers are transboundary, which leads to the need of sound assessment of water availability and demand in future under the conditions of uncertainty related to the climate change. This study applies scientific approach to assess the current and future water availability and demand. The WEAP ("Water Evaluation and Planning") modeling framework, which allows applying an integrated approach for water use planning, was used in this study. The model used dataset developed during modeling of the water inflow originated from the upper watershed. Cryospheric-hydrological model was developed which modelled all major processes in the spatial scale of 1 km<sup>2</sup> and daily temporal. The model is based on modeled river flow data until 2050, obtained from Global Circulation Models. Model validation indicated high reliability of the outputs. The results of the study show that modelled total annual volume of the river flow in the lower reach will reduce by 22-28 % in the Syrdarya River and by 26-35 % in the Amudarya River until 2050. Significant flow reduction (45 %) is expected during summer months in the both river basins. The annual water demand by 2050 will increase by 3.0-3.9 % in the Syrdarya River basin, and by 3.8-5.0 % in the Amudarya River basin. Annual unmet demand in the in the Syrdarya River basin will increase from currently 8,8 % to 31,6 - 39,7 % in 2050, and in the Amudarya River basin from 24,8 % to 45,8 - 54,5 %.*

*Целью данной работы является разработка, калибровка и оценка гидрологической модели для нижних течений рек Амударья и Сырдарья, включающей различные сценарии оценки влияния изменения климата на образование водных ресурсов обеих рек. Эти реки являются трансграничными, что приводит к необходимости правильной оценки объемов воды этих рек в будущем и потребности в водных ресурсах в условиях изменения климата. В работе был применен научный подход к оценке доступности и потребности в воде, как в настоящий период, так и в будущем. Моделирование производилось в среде WEAP («Система оценки и планирования водных ресурсов»), позволяющей осуществлять интегрированный подход к планированию использования водных ресурсов. В модели были использованы данные, полученные при разработке сценариев притока воды из верхнего течения рек в нижнее. Для разработки данного сценария была использована криосферно-гидрологическая модель, моделирующая все основные процессы в масштабе 1 км<sup>2</sup> и имеющая временное разрешение 1 день. Модель основывалась на данных Глобальных моделей циркуляции (ГМЦ) для моделирования образования речного потока до 2050 г. Оценка прогноза модели показала высокую достоверность. Результаты показывают, что спрогнозированный общий объем годового стока в нижнем течении сократится на 22-28 % по р. Сырдарья и на 26-35 % - по р. Амударья к 2050 году. Значительное уменьшение стока (45 %) ожидается в течение летних месяцев в обоих бассейнах рек. Ежегодно потребность в воде к 2050 году в бассейне р. Сырдарья увеличится на 3,0-3,9 %, в бассейне р. Амударья - на 3,8-5,0 %. Ежегодная неудовлетворенная потребность в бассейне р. Сырдарья увеличится с 8,8 % в настоящее время до 31,6-39,7 % в 2050 году, в бассейне р. Амударья с 24,8 % до 45,8-54,5 %.*

**Введение.** Целью данной работы является разработка, калибровка и оценка гидрологической модели для нижних течений рек Амударья и Сырдарья, включающей различные сценарии оценки влияния изменения климата на образование водных ресурсов обеих рек. Эти реки являются трансграничными, что приводит к необходимости правильной оценки объемов воды этих рек в будущем и потребности в водных ресурсах в условиях изменения климата. В работе был применен научный подход к оценке доступности и потребности в воде как в настоящий период, так и в будущем.

**Методы.** В данной работе была применена модель WEAP («Система оценки и планирования водных ресурсов»), позволяющая осуществлять интегрированный подход к планированию использования водных ресурсов (Raskin и др., 1992). В модели были использованы данные, полученные при разработке сценариев притока воды из верхнего течения рек в нижнее (Immerzeel и др., 2012). Для разработки данного сценария была использована криосферно-гидрологическая модель, моделирующая все основные процессы в масштабе 1 км<sup>2</sup> и имеющая временное разрешение 1 день.

Модель основывалась на данных Глобальных моделей циркуляции (ГМЦ) для моделирования образования речного потока до 2050 г.

Моделирование в среде WEAP включает расчет потребности в воде, водоподачу, отток, инфильтрацию, эвапотранспирацию и др. при изменяющихся гидрологических и адаптационных сценариях. Адаптационные сценарии позволяют оценить весь спектр опций управления и развития водных ресурсов, принимая во внимание потребности в воде многочисленных, в том числе конкурирующих, водопользователей.

Гидрологическая модель разработана в ежемесячном масштабе для трех интервалов: базовая ситуация (2001-2010) и на будущее (2021-2030 и 2041-2050). Для каждого из этих интервалов был рассчитан один год, являющийся репрезентативным, путем осреднения данных десятилетнего периода. Модель была откалибрована на базовый период 2001-2010 гг. В модели были определены различные площади с потреблением воды на сельское хозяйство и коммунальные нужды. Данные по водохранилищам, землепользованию, демографии и др. для пяти стран Средней Азии были получены с портала [www.cawater-info.uz](http://www.cawater-info.uz). Кроме того, в модель WEAP были включены данные по водным ресурсам, образующимся в нижнем течении рек. Для этого были оцифрованы водоразделы, совпадающие с зонами потребления. Для этих водоразделов были получены среднемесячные значения температуры и осадков, при помощи которых были рассчитаны поступающая вода (с осадками) и эвапотранспирация с использованием модифицированного метода Hargreaves (Droogers and Allen, 2002):

$$ET_{\text{реф}} = 0,0013 * 0,408RA * (T_{\text{ср}} + 17,0) * (TD - 0.0123P)^{0.76}$$

где RA – поступающее внеземное излучение ( $\text{МДжМ}^{-2}\text{д}^{-1}$ ),  $T_{\text{ср}}$  – средняя температура, TD - разность температур ( $T_{\text{макс}} - T_{\text{мин}}$ ) и P – входящие осадки.

Для проведения расчетов среднегодовое потребление в коммунальном хозяйстве было принято в размере  $70,8 \text{ м}^3$  на душу населения для всех пяти стран. При этом эффективное водопотребление было принято в размере 10 %, означающее, что 90 % воды возвращается в водохозяйственную систему и в дальнейшем может быть использовано в нижнем течении. Землепользование было поделено на 8 категорий (хлопок, фураж, кукуруза, сады, зерновые, бахчевые, картофель). Коэффициент эффективности использования воды в сельском хозяйстве был принят на уровне 90–95 %, соответственно, для сельскохозяйственных водопотребителей верхнего и нижнего течения. В модель также были включены и крупные водохранилища на обеих реках, входными данными для которых послужили данные, полученные при использовании ГМЦ. Ежедневный приток был усреднен на период 2001-2010 гг. Калибровка модели на базовую ситуацию осуществлялась отдельно для каждого бассейна на основе данных по семи крупным водохранилищам, а также данных по притоку воды в Аральское море, полученных с портала [www.cawater-info.uz](http://www.cawater-info.uz). Результаты калибровки на базовый период для бассейна обеих рек показали высокую степень достоверности модели (показано на рис. 1 на примере Туямуюнского водохранилища). Помимо калибровки модели по данным стока водохранилищ были использованы данные по стоку воды обеих рек в Аральское море. Замеренный и смоделированный годовой приток воды в Аральское море в течение базового периода составил по р. Сырдарья 7082 и 7472 млн  $\text{м}^3$  (ошибка 5,5 %), по р. Амударья - 7309 и 7372 млн  $\text{м}^3$  (ошибка 0,9 %).

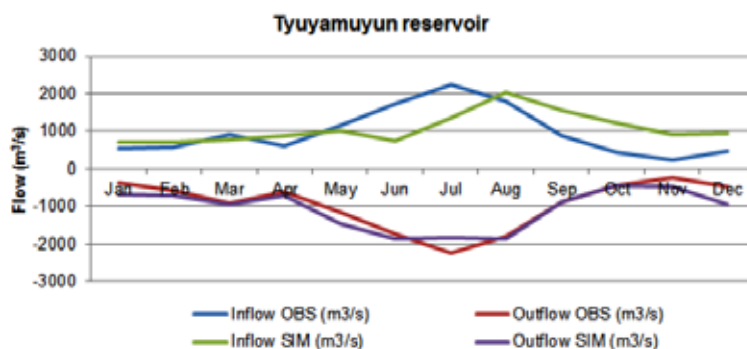


Рис. 1 - Замеренный и смоделированный приток и отток воды в Туямуюнском водохранилище за базовый период

В модели WEAP, помимо потребностей в воде сельского хозяйства и коммунально-бытовых нужд, были также учтены и другие потребности (например, использование воды для производства электроэнергии), не включенные напрямую в модели, при помощи задания специальных правил. Также были учтены последовательное использование сельхозкультур в течение одного года, инфильтрация воды в супесчаных и суглинистых почвах и другие параметры. Достоверность результатов моделирования была проверена на оценке реальной и смоделированной потребности в воде в бассейне р. Амударья. Смоделированная среднегодовая потребность в воде в размере 56672 млн м<sup>3</sup> отлично коррелирует с отчетными данными 56638–58565 млн м<sup>3</sup> на период 1997-2010, с ошибкой всего в 0,06-3,23 %.

**Результаты. Базовый период.** Согласно модели, потребность сельского хозяйства в воде в бассейне р. Сырдарья в летний период в тысячу раз превышает потребность в воде коммунального хозяйства и изменяется от 0 в зимний период до 8600 млн м<sup>3</sup> в июле (рис. 2). Наибольшее количество воды используется в Ферганской долине и в расположенных рядом с долиной областях.

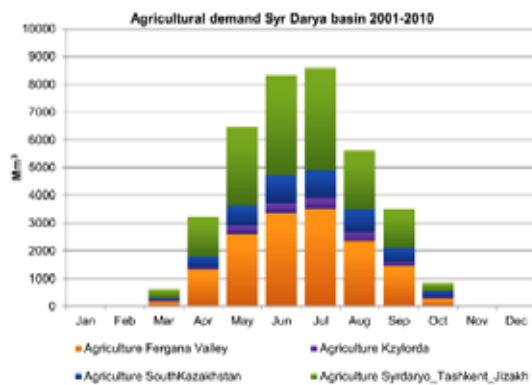


Рис. 2 - Среднемесячная потребность в воде сельского хозяйства в бассейне р. Сырдарья за базовый период 2001-2010 гг.

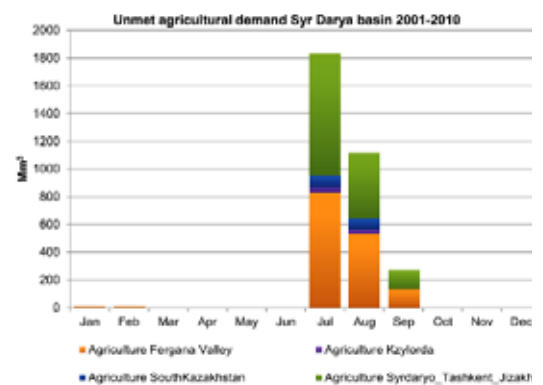


Рис. 3 - Среднемесячная неудовлетворенная потребность в воде сельского хозяйства в бассейне р. Сырдарья за базовый период 2001-2010 гг.

Неудовлетворенная потребность в воде возникает во всех зонах в период с июля по сентябрь (рис. 3), когда запас воды в водохранилищах максимально использован. Нужды коммунального хозяйства в воде в размере 9 млн м<sup>3</sup> в год остаются относительно постоянными в течение всего периода.

Неудовлетворенная потребность в воде для всего бассейна р. Сырдарья составляет примерно 8,7 % в год.

Аналогично изменяются потребность и неудовлетворенная потребность в воде водопотребителей в бассейне р. Амударья (рис. 4). Пик потребности возникает в июле, достигая значения 13200 млн м<sup>3</sup> в месяц. Территориями с наиболее высокой потребностью в воде являются долина Зеравшана, пустыня Каракум, а также площади вблизи Аральского моря.

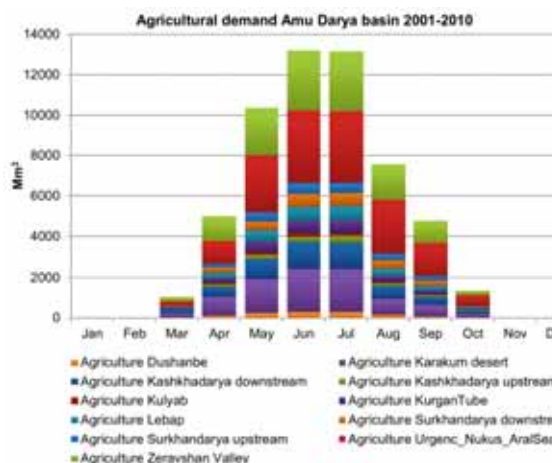


Рис. 4 - Среднемесячная потребность сельского хозяйства в воды в период 2001-2010 гг.

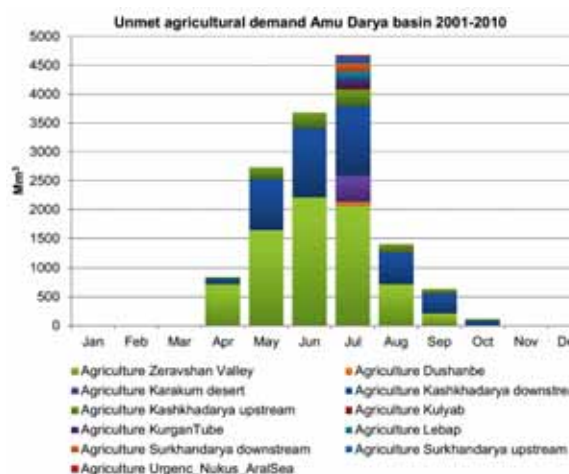


Рис. 5 - Среднемесячная потребность сельского хозяйства в воды в период 2001-2010 гг.

В отличие от бассейна р. Сырдарья, неудовлетворенная потребность в бассейне р. Амударья возникает на всей территории уже в апреле (рис. 5). Наибольшие значения неудовлетворенной потребности, увеличивающиеся вплоть до июля, наблюдаются на территории притоков р. Амударья (долина р. Зеравшан, Кашкадарья). В период с августа по октябрь неудовлетворенная потребность наблюдается только на вышеупомянутых территориях, а в период с ноября по март потребность удовлетворяется.

Потребность коммунального хозяйства в воде составляет примерно 10 млн м<sup>3</sup> в месяц. Неудовлетворенная потребность составляет примерно 3,5 млн м<sup>3</sup>, возникая в период с апреля по октябрь и максимальными значениями в июле. Для всего бассейна реки неудовлетворенная потребность составляет 24,9 % на годовой основе.

Согласно модели, общий годовой объем стока воды в Аральское море в среднем составляет 14844 млн м<sup>3</sup> в год. При этом смоделированные значения стока по обеим рекам оказались примерно одинаковыми ( $\pm 7200$  млн м<sup>3</sup>). Полученные данные по стокам хорошо коррелируют с наблюдаемыми значениями ежегодного притока воды в Аральское море.

*Прогноз доступности водных ресурсов на период 2021-2030 и 2041-2050.*

При моделировании прогноза были сделаны следующие предположения: численность населения, сельскохозяйственные площади и попуски из водохранилищ останутся постоянными на уровне 2000 г. Это было сделано с целью выделения эффекта влияния изменения климата от других причин, влияющих на потребность и неудовлетворенную потребность в воде. Были использованы пять ГМЦ, в данной статье представлены усредненные значения.

В бассейне р. Сырдарья годовая потребность в воде увеличивается на 3,7 % до 2041-2050 гг. (рис. 6). Однако годовая неудовлетворенная потребность увеличивается с 8,8 % в 2001-2010 годах до 34,3 % в 2041-2050 гг. Такое повышение объясняется повышением температуры, приводящим к усилению эвапотранспирации и, следовательно, к увеличению неудовлетворенных потребностей. Кроме того, поскольку изменение объема осадков незначительно, значительное увеличение неудовлетворенной потребности вызывается снижением формирования объемов стока в верховьях рек.

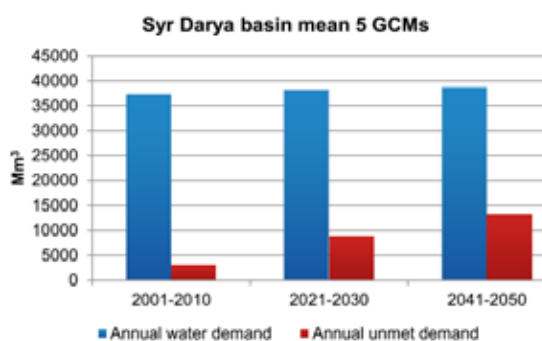


Рис. 6 - Изменения годовой потребности и неудовлетворенной потребности в бассейне р. Сырдарья

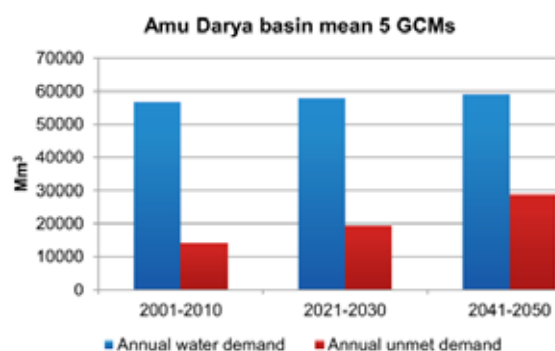
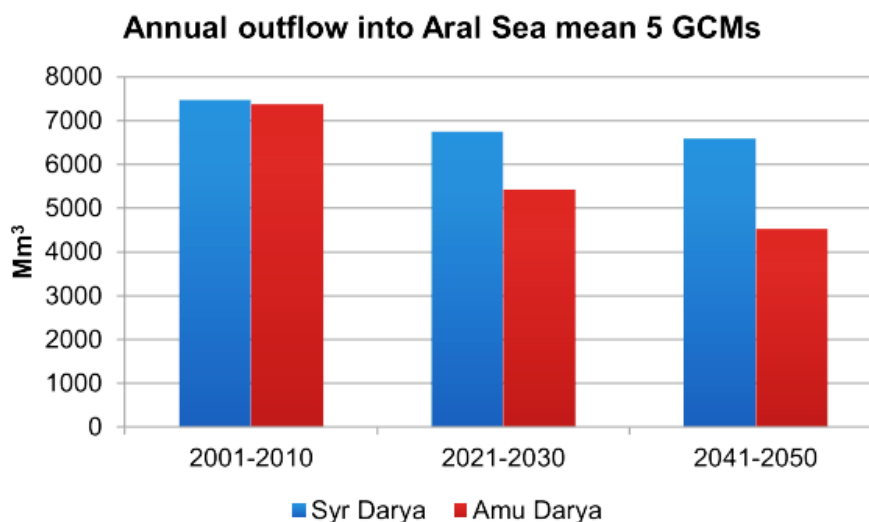


Рис. 7 - Изменения годовой потребности и неудовлетворенной потребности в бассейне р. Амударья

Ежегодная прогнозируемая потребность в воде в бассейне р. Амударья к 2041-2050 гг. увеличивается на 4,4 %, а неудовлетворенная потребность увеличивается с 24,8 % в 2001-2010 годах до 48,6 % в 2041-2050 гг. Несколько повышенная потребность в бассейне р. Амударья (4,4 %) по сравнению с потребностью в бассейне р. Сырдарья (3,8 %) связана с более высоким прогнозируемым повышением температуры.

Прогнозируемый среднегодовой сток в Аральское море уменьшится по обеим рекам (рис. 8). При этом, если сток р. Сырдарья в период до 2041-2050 гг. уменьшится на 10,8 %, то сток р. Амударья уменьшится на 38,3 %.



**Выводы.** В данной работе осуществлена попытка смоделировать изменения потребности и неудовлетворенной потребности в воде основных водопотребителей – сельского хозяйства и коммунального водоснабжения - в регионе бассейна Аральского моря. Разработка, калибровка и оценка достоверности модели поможет оценить изменения доступности водных ресурсов, а также опции распределения и управления этими трансграничными реками с учетом влияния изменения климата на водные ресурсы в регионе.

Оценка прогноза модели показала высокую достоверность. Спрогнозированный общий объем годового стока в нижнем течении сократится на 22-28 % по р. Сырдарья и на 26-35 % по р. Амударья к 2050 году. Значительное уменьшение стока (45 %) ожидается в течение летних месяцев в обоих бассейнах рек. Ежегодно потребность в воде к 2050 году в бассейне р. Сырдарья увеличится на 3,0-3,9 %, в бассейне р. Амударья на 3,8-5,0 %. Ежегодная неудовлетворенная потребность в бассейне р. Сырдарья увеличится с 8,8 % в настоящее время до 31,6-39,7 % в 2050 году, в бассейне р. Амударья с 24,8 % до 45,8-54,5 %.

*ЛИТЕРАТУРА:*

1. Droogers, P., and Allen R.G. (2002), Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions, *Irrigation and Drainage Systems*, 16, 33-45.
2. Immerzeel, W., Droogers P., Terink W., Hoozeveld J., Hellegers P., Bierkens M. and Beek R. van (2011), *Middle-East and Northern Africa Water Outlook*, Wageningen.
3. Raskin, P., E. Hansen, Zhu Z. and Iwra M. (1992), Simulation of Water Supply and Demand in the Aral Sea Region, *Water International*, 17, 55-67.