



**USAID**

ОТ АМЕРИКАНСКОГО НАРОДА

**Семинары по моделированию:  
*Разработка модели WEAP для Амударьи:  
ЛЕДНИКИ и ГИДРОЛОГИЯ***

---

**РЕГИОНАЛЬНЫЙ ПРОЕКТ USAID ПО ВОДНЫМ  
РЕСУРСАМ И ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ**



# Гидрологическое моделирование

---

# Основные рекомендации для руководства по конфигурации модели

## Гидрология

- Землепользование и территории на разных высотах
- Типы почв
- Температура и осадки
- Расположение основных объектов
  - Притоки
  - Дамбы, плотины
  - Гидрологические посты

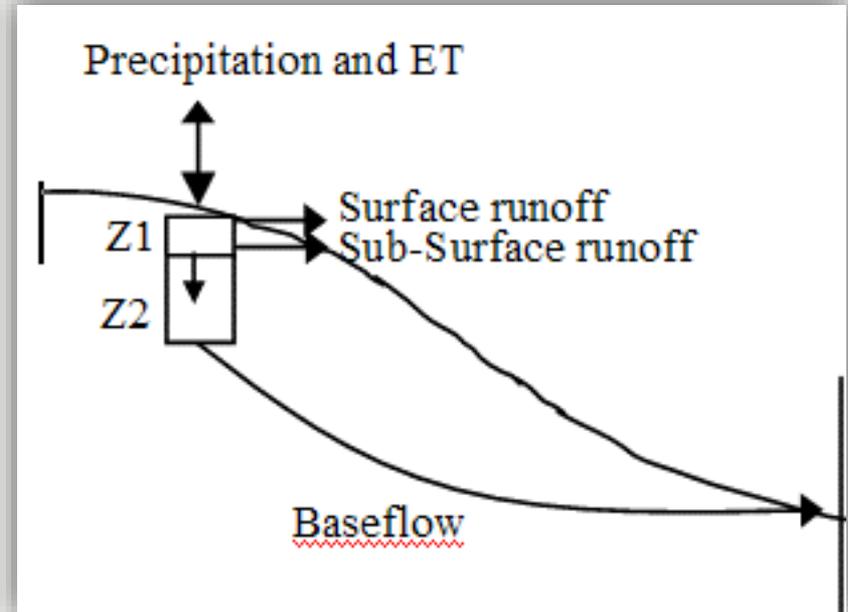




# Метод определения влажности почвы WEAP (он же метод 2-х ведер)

Почвенный профиль разделен на две зоны

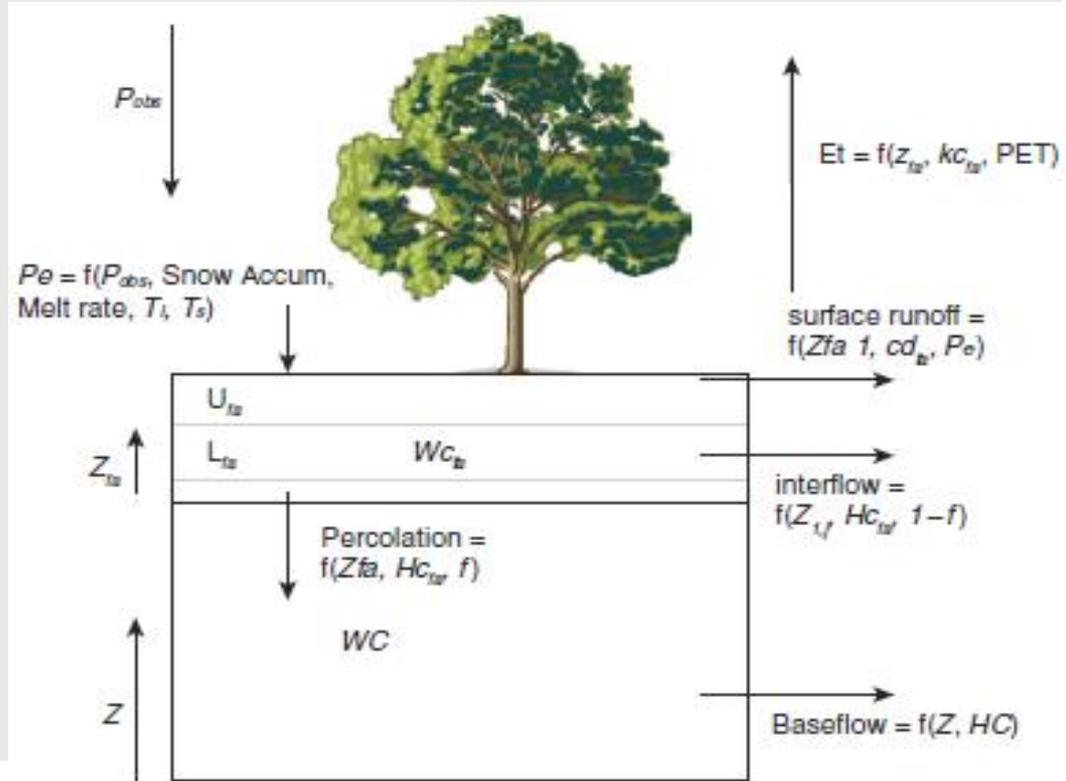
- Неглубокая почва
  - Корневая зона
  - Растения забирают воду для эвапотранспирации (ЭТ)
- Глубокая почва
  - Подземные воды
  - Способствует образованию базового стоку



# WEAP Гидрология - Метод определения влажности почвы

- Одномерное уравнение рассчитывает водный баланс для неглубокого почвенного профиля ( $z1$ ) и глубокого почвенного профиля ( $z2$ )
- Учитывает влияние накопления воды в почве на сток, ЭТ, межпотоковый сток, просачивание (перколяцию) и базовый сток
- Каждый водосборный бассейн может быть пространственно подразделен на основе видов землепользования, типа почвы, топографии и т.д.
  - Автоматическое разграничение (разбиение) водосборов разделяет водосборы на основе землепользования и высоты над уровнем моря

$$Rd_j \frac{dz_{1,j}}{dt} = P_s(t) - PET(t)k_{c,j}(t)\left(\frac{5z_{1,j} - 2z_{1,j}^2}{3}\right) - P_s(t)z_{1,j}^{RRF_j} - f_j k_{s,j} z_{1,j}^2 - (1 - f_j) k_{s,j} z_{1,j}^2$$



# WEAP Гидрология - Метод определения влажности почвы

Изменение  
запасов  
почвенной  
воды =

Осадки - Эвапотранспирация -

Прямой  
поверхн  
остный  
сток

Поток  
почвенных  
вод к  
ручью,  
реке

Поток  
почвенной  
воды в  
грунтовые  
воды

$$Rd_j \frac{dz_{1,j}}{dt} = P_\varepsilon(t) - PET(t)k_{e,j}(t)\left(\frac{5z_{1,j} - 2z_{1,j}^2}{3}\right) - P_\varepsilon(t)z_{1,j}^{RRF_j} - f_j k_{s,j} z_{1,j}^2 - (1 - f_j)k_{s,j} z_{1,j}^2$$

Зона  
неглубоких  
почв

Изменение  
запасов  
почвенной  
воды =

Просачивание из всех  
ответвлений в пределах -  
водосборного бассейна

Сток в реку (т.е.  
базовый сток)

Зона глубокого  
залегания  
почвы

$$S_{\max} \frac{dz_2}{dt} = \left( \sum_{j=1}^N (1 - f_j) k_{s,j} z_{1,j}^2 \right) - k_{s2} z_2^2$$

# Основные параметры для зоны неглубоких почв (он же верхний ковш)

Data for: Current Accounts (1980)  Manage Scenarios  Data Expressions Report

Land Use Climate Glacier Flooding Yield Water Quality Cost Advanced

Initial Z1	Deep Water Capacity		Deep Conductivity		Initial Z2
Area	Kc	Soil Water Capacity	Runoff Resistance Factor	Preferred Flow Direction	Root Zone Conductivity

- Kc
  - Определяет потери воды в атмосферу (т.е. эвапотранспирация)
- Влагоемкость почвы
  - Влияет на уровень влажности почвы.
- Коэффициент сопротивления стоку
  - Эквивалент шероховатости поверхности. Также зависит от уклона
- Предпочтительное направление потока
  - Определяет, течет ли почвенная вода к грунтовым или поверхностным водам.
- Проводимость корневой зоны
  - Определяет, насколько быстро вода перетекает из почвы в грунтовые или поверхностные воды

# Чувствительность модели: Влагоемкость почвы

- Увеличение влагоемкости почвы уменьшает влажность почвы и увеличивает инфильтрацию в почву, что приводит к уменьшению стоков
- Низкая влагоемкость почвы приводит к увеличению поверхностного стока во влажный сезон и снижению базового стока в сухой сезон, поскольку в почве удерживается меньше воды

$$Rd_j \frac{dz_{1,j}}{dt} = P_s(t) - PET(t)k_{c,j}(t)\left(\frac{5z_{1,j} - 2z_{1,j}^2}{3}\right) - P_s(t)z_{1,j}^{RRF_j} - f_j k_{c,j} z_{1,j}^2 - (1 - f_j)k_{c,j} z_{1,j}^2$$

Изменение запасов почвенной воды

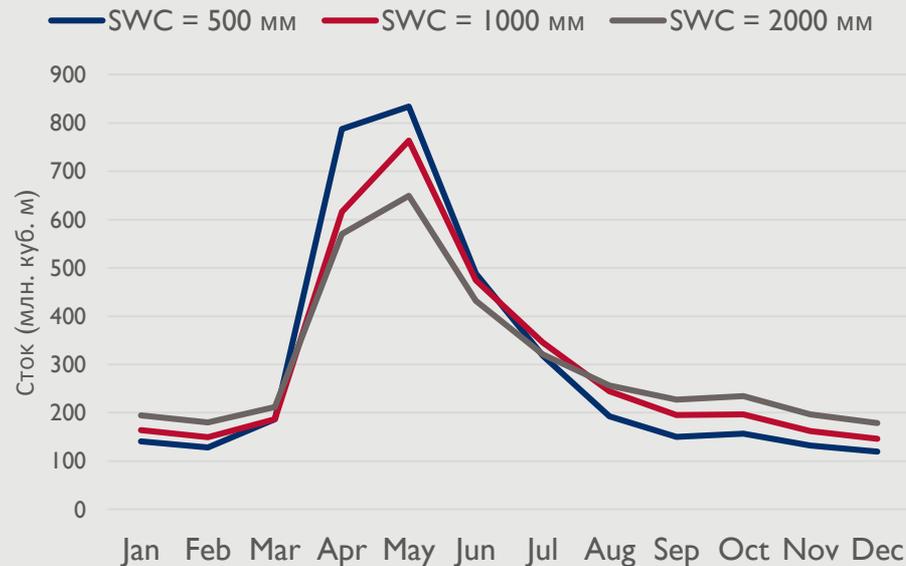
= Осадки - Эвапотранспирация -

Прямой поверхностный сток

Поток почвенных вод к ручью

Поток почвенных вод в грунтовые воды

Среднемесячный сток воды



# Чувствительность модели: Коэффициент урожайности (Kc)

- Большой Kc увеличивает ET и уменьшает сток
- Меньше поверхностного стока и меньше основного стока

$$Rd_j \frac{dz_{1,j}}{dt} = P_s(t) - PET(t)k_{c,j}(t)\left(\frac{5z_{1,j} - 2z_{1,j}^2}{3}\right) - P_s(t)z_{1,j}^{RRF_j} - f_j k_{z,j} z_{1,j}^2 - (1 - f_j)k_{z,j} z_{1,j}^2$$

Изменение запасов почвенной воды

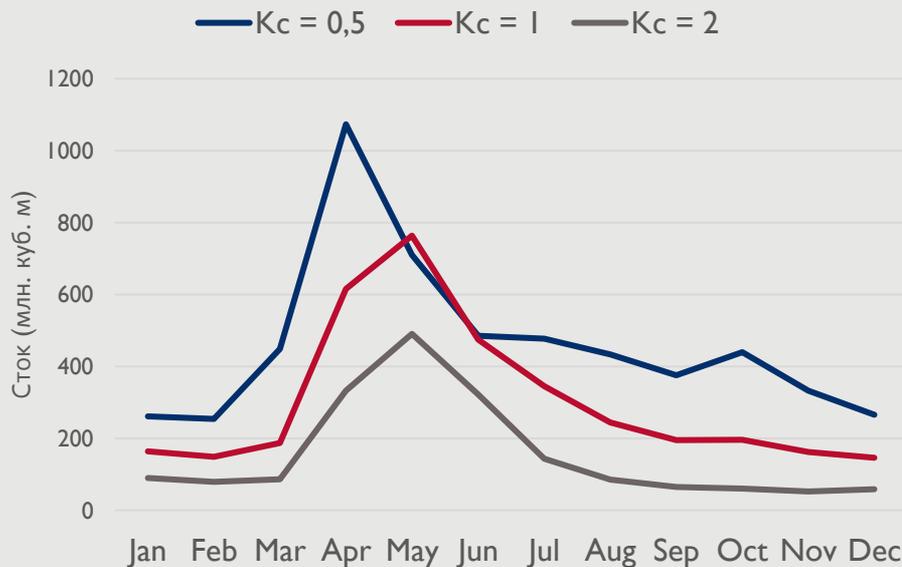
= Осадки - Эвапотранспирация -

Поверхностный сток

- Поток почвенных вод к ручью

- Поток почвенной воды в грунтовые воды

Среднемесячный сток воды



# Чувствительность модели: Коэффициент сопротивления стоку

- Снижение коэффициента сопротивления стоку увеличивает сток в реку во влажный сезон, в то же время снижая базовый сток в сухой сезон
- Также смещается время гидрографа стока

$$Rd_j \frac{dz_{1,j}}{dt} = P_s(t) - PET(t)k_{c,j}(t)\left(\frac{5z_{1,j} - 2z_{1,j}^2}{3}\right) - P_s(t)z_{1,j}^{RRF_j} - f_j k_{c,j} z_{1,j}^2 - (1 - f_j)k_{c,j} z_{1,j}^2$$

Изменение запасов почвенной воды

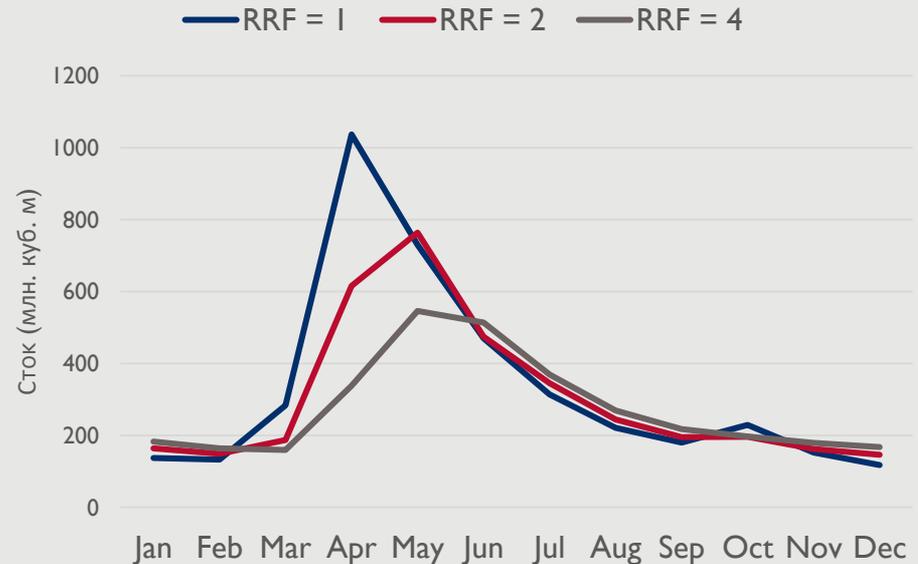
= Осадки - Эвапотранспирация -

Прямой поверхностный сток

Поток почвенных вод к ручью

Поток почвенных вод в грунтовые воды

Среднемесячный сток воды



# Чувствительность модели: Предпочтительное направление потока

- PFD = 0
  - Весь поток движется вертикально
- PFD = 1
  - Весь поток движется горизонтально
- Увеличение PFD увеличивает поверхностный сток во влажный период и уменьшает базовый сток в сухой период

$$Rd_j \frac{dz_{1,j}}{dt} = P_s(t) - PET(t)k_{e,j}(t)\left(\frac{5z_{1,j} - 2z_{1,j}^2}{3}\right) - P_s(t)z_{1,j}^{RRF_j} - f_j k_{e,j}z_{1,j}^2 - (1 - f_j)k_{e,j}z_{1,j}^2$$

Изменение запасов почвенной воды

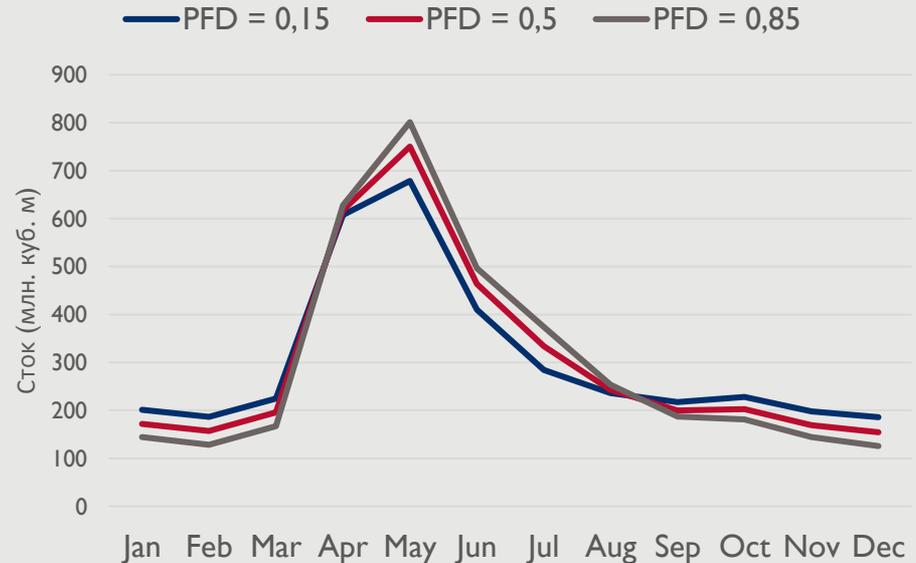
= Осадки - Эвапотранспирация -

Прямой поверхностный сток

Поток почвенных вод к ручью

Поток почвенных вод в грунтовые воды

Среднемесячный сток воды



# Чувствительность модели: Проводимость корневой зоны

- Увеличение проводимости корневой зоны увеличивает скорость потока из почв, что приводит к увеличению стока реки

$$Rd_j \frac{dz_{1,j}}{dt} = P_s(t) - PET(t)k_{c,j}(t)\left(\frac{5z_{1,j} - 2z_{1,j}^2}{3}\right) - P_s(t)z_{1,j}^{RRF_j} - f_j k_{z,j} z_{1,j}^2 - (1 - f_j) k_{z,j} z_{1,j}^2$$

Изменение запасов почвенной воды

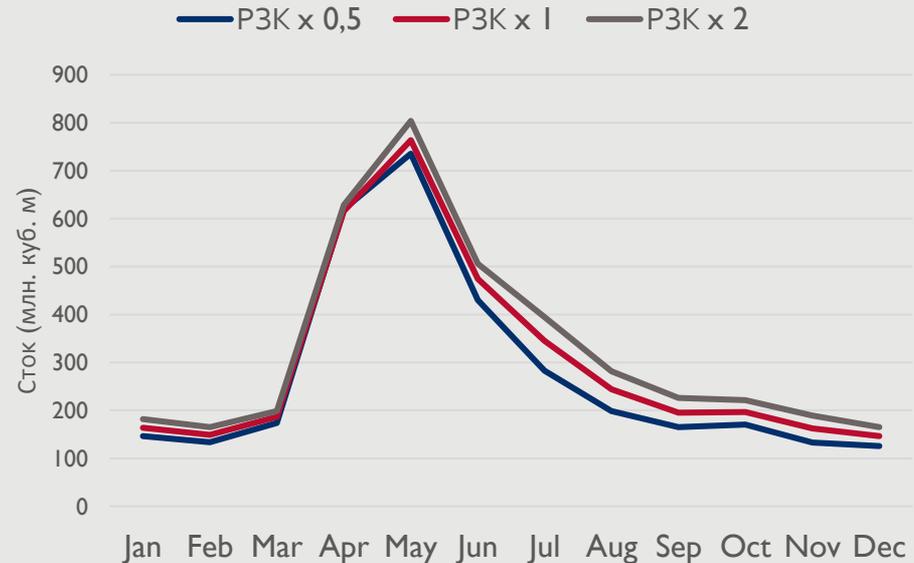
= Осадки - Эвапотранспирация -

Прямой поверхностный сток

Поток почвенных вод к ручью

Поток почвенных вод в грунтовые воды

Среднемесячный сток воды



# Ключевые параметры для глубоких почв (он же донный ковш)

The screenshot shows a software interface with a top navigation bar containing 'Data for: Current Accounts (1980)', 'Manage Scenarios', and 'Data Expressions Report'. Below this is a row of tabs: 'Land Use', 'Climate', 'Glacier', 'Flooding', 'Yield', 'Water Quality', 'Cost', and 'Advanced'. A red box highlights the 'Climate' tab and the 'Deep Water Capacity' and 'Deep Conductivity' parameters in the table below. The table has columns for 'Initial Z1', 'Deep Water Capacity', 'Deep Conductivity', and 'Initial Z2'. The 'Area' column is highlighted in blue.

Initial Z1	Deep Water Capacity	Deep Conductivity	Initial Z2	
Area	Soil Water Capacity	Runoff Resistance Factor	Preferred Flow Direction	Root Zone Conductivity

- Глубинная почвенная емкость
  - Общая глубина воды, которая может быть запасена в глубокой почве
- Глубинная почвенная проводимость
  - Определяет скорость потока из глубокого почвенного слоя (базовый поток)

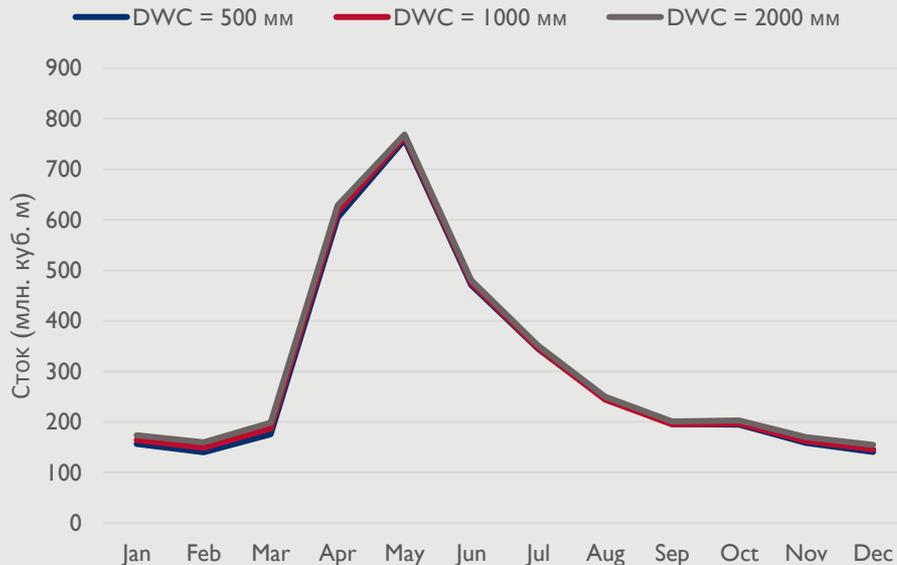
# Чувствительность модели: Влагоемкость глубоких почв

- Модель менее чувствительна к изменениям глубокой почвенной емкости
- Более высокая мощность глубинных вод увеличивает базовый сток

$$S_{\max} \frac{dz_2}{dt} = \left( \sum_{j=1}^N (1 - f_j) k_{z,j} z_{1,j}^2 \right) - k_{z,2} z_2^2$$

Изменение запасов почвенной воды = Просачивание из всех подземных ветвей в пределах водосборного бассейна - сток в реку (т.е. базовый сток)

Среднемесячный сток воды



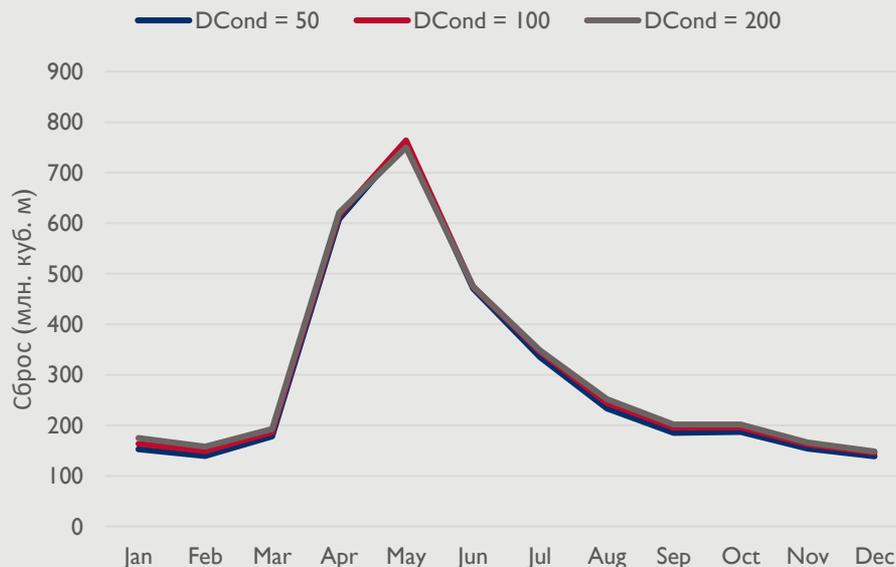
# Чувствительность модели: Глубинная проводимость ПОЧВЫ

- Модель относительно нечувствительна к изменениям глубинной проводимости
- Более высокая проводимость увеличивает базовый поток

$$S_{\max} \frac{dz_2}{dt} = \left( \sum_{j=1}^N (1 - f_j) k_{z,j} z_{1,j}^2 \right) - k_{z,2} z_2^2$$

Изменение запасов почвенной воды = Просачивание из всех подземных ветвей в пределах водосборного бассейна - сток в реку (т.е. базовый сток)

Среднемесячный сброс



# Требования к данным

- Входные данные
  - Температура и осадки
  - Виды землепользования
  - Уклоны
  - Типы почв
- Калибровочные данные
  - Высота снежного покрова
  - Естественный речной поток
  - Эвапотранспирация (если имеется)



# Настройка (конфигурация) параметров калибровки

---

# Валидация (проверка) модели

- Нам необходимо проверить модель, используя данные наблюдений.
- На эти данные может влиять один или несколько аспектов системы моделирования WEAP

Валидационные данные	Ледники	Гидрология	Гидроэнергетика	Ирригация	Бытовые/ муниципальные/ промышленные	Управление водными ресурсами/опера ции
Изменение объема/площади ледника	X					
Глубина снежного покрова	X	X				
Естественный поток	X	X				
Генерация гидроэлектроэнергии	X	X	X			X
Требования к влаге для сельскохозяйственных культур				X		
Урожайность сельскохозяйственных культур				X		X
Ирригация		X		X		X
Переброски на реках		X		X	X	X
Измененный поток	X	X	X	X	X	X
Запасы в водохранилищах	X	X	X	X	X	X

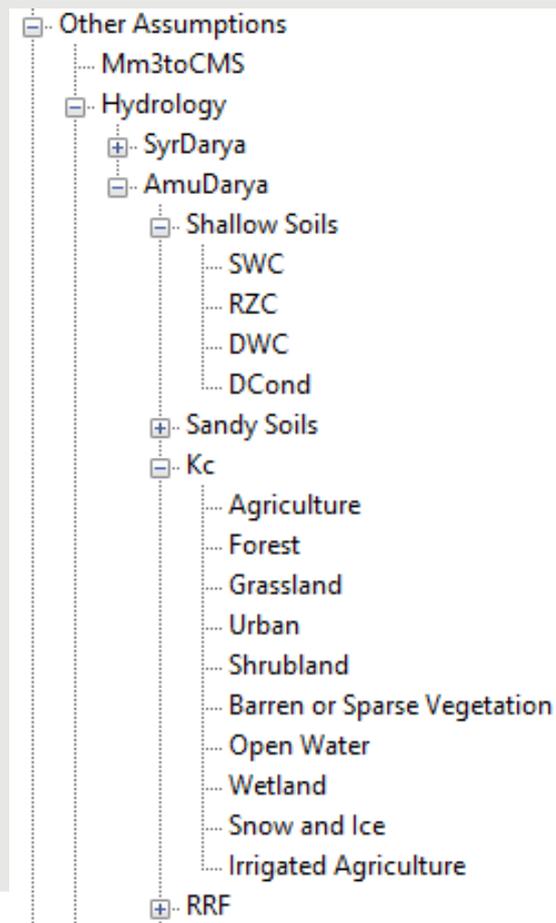
# Важные соображения (замечания)

- Какие факторы влияют на различные параметры?



# Привязка параметров к общему набору значений

- Установите новые переменные в WEAP в разделе Другие допущения
- Все объекты водосбора указывают на эти значения, что позволяет легко обновлять значения по всей модели.
- Создавайте новые ветви на основе наиболее важных факторов. Для модели Амударьи мы использовали:
  - **Землепользование**
    - Kc и коэффициент сопротивления стоку
  - **Тип почвы**
    - Водоудерживающая способность и гидравлическая проводимость
  - **Уклоны**
    - Предпочтительное направление потока



# Привязка параметров к общему набору значений

- Параметры внутри каждого водосбора ссылаются на ветви в разделе Другие допущения

Land Use Climate Glacier Flooding Yield Water Quality Cost Advanced

Preferred Flow Direction Slope Initial Z1 Deep Water Capacity Deep Conductivity Initial Z2

Area **Kc** Runoff Resistance Factor Soil Water Capacity Root Zone Conductivity

Crop coefficient, relative to the reference crop. For Simplified Coefficient Method, Kc = 0 means this area is double cropped with another area. If merely fallow, set greater than 0. For monthly variation, use Monthly Time-Series Wizard. Range: 0 and higher Default: 1 [? Help](#)

Elevation 4000 to 4250 m	1975
Agriculture	Other\Hydrology\AmuDarya\Kc\Agriculture
Forest	Other\Hydrology\AmuDarya\Kc\Forest
<b>Grassland</b>	<b>Other\Hydrology\AmuDarya\Kc\Grassland</b>
Wetland	Other\Hydrology\AmuDarya\Kc\Wetland
Shrubland	Other\Hydrology\AmuDarya\Kc\Shrubland
Barren or Sparse Vegetation	Other\Hydrology\AmuDarya\Kc\Barren or Sparse Vegetation
Open Water	Other\Hydrology\AmuDarya\Kc\Open Water
Snow and Ice	Other\Hydrology\AmuDarya\Kc\Snow and Ice
Irrigated Agriculture	Other\Hydrology\AmuDarya\Kc\Irrigated Agriculture



# Калибровочные метрики (показатели)

---

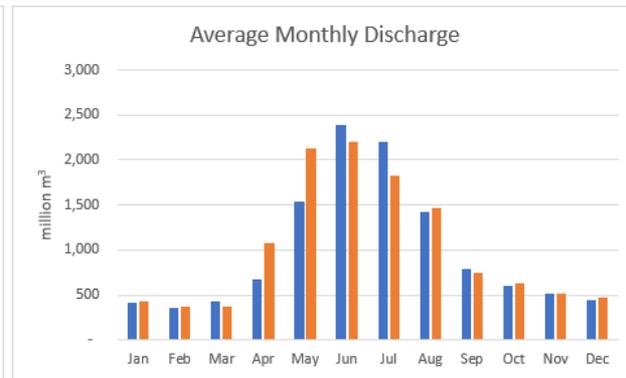
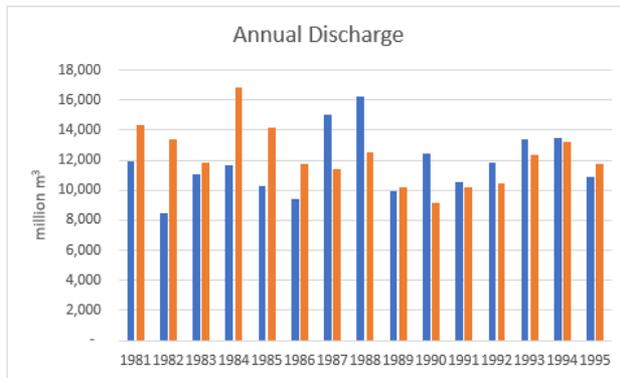
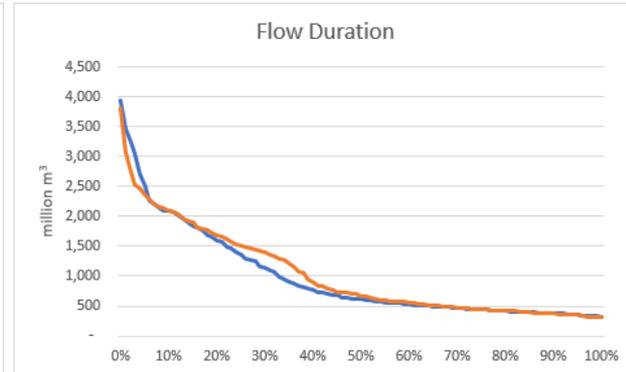
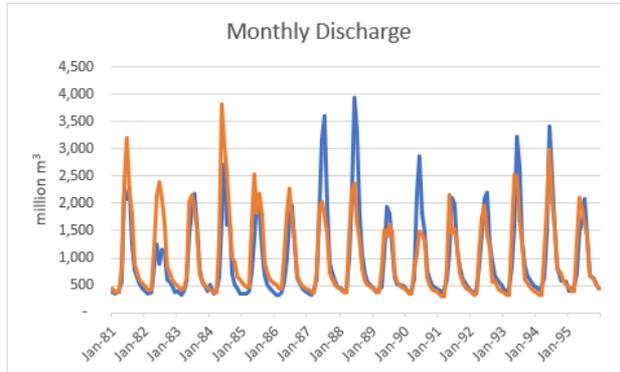
# Калибровочные метрики (показатели)

- Откалибруйте модель для соответствия:
  - Временным рядам месячного стока
  - Общему годовому стоку
  - Среднемесячному стоку (т.е. годовым гидрографам)
  - Диапазону стока (т.е. кривая продолжительности стока)
- Включение нескольких показателей позволяет добиться лучшей калибровки модели
  - Эффективность Нэша-Сатклиффа (NSE) - Измеряет, насколько хорошо моделируемый месячный сток согласуются с наблюдаемым
  - Процентное смещение (PBIAS) - Измеряет, насколько близок суммарный годовой сток к наблюдаемому.
  - Отношение стандартных отклонений (SDR) - Измеряет, насколько хорошо модель отражает диапазон наблюдаемого стока

# Гидрологическая калибровка

NSE = 0,62 PBIAS = 7,1% SDR = 0,95  
(Идеал = 1,0) (Идеал = 0%) (Идеал = 1,0)

■ Observed ■ Modeled



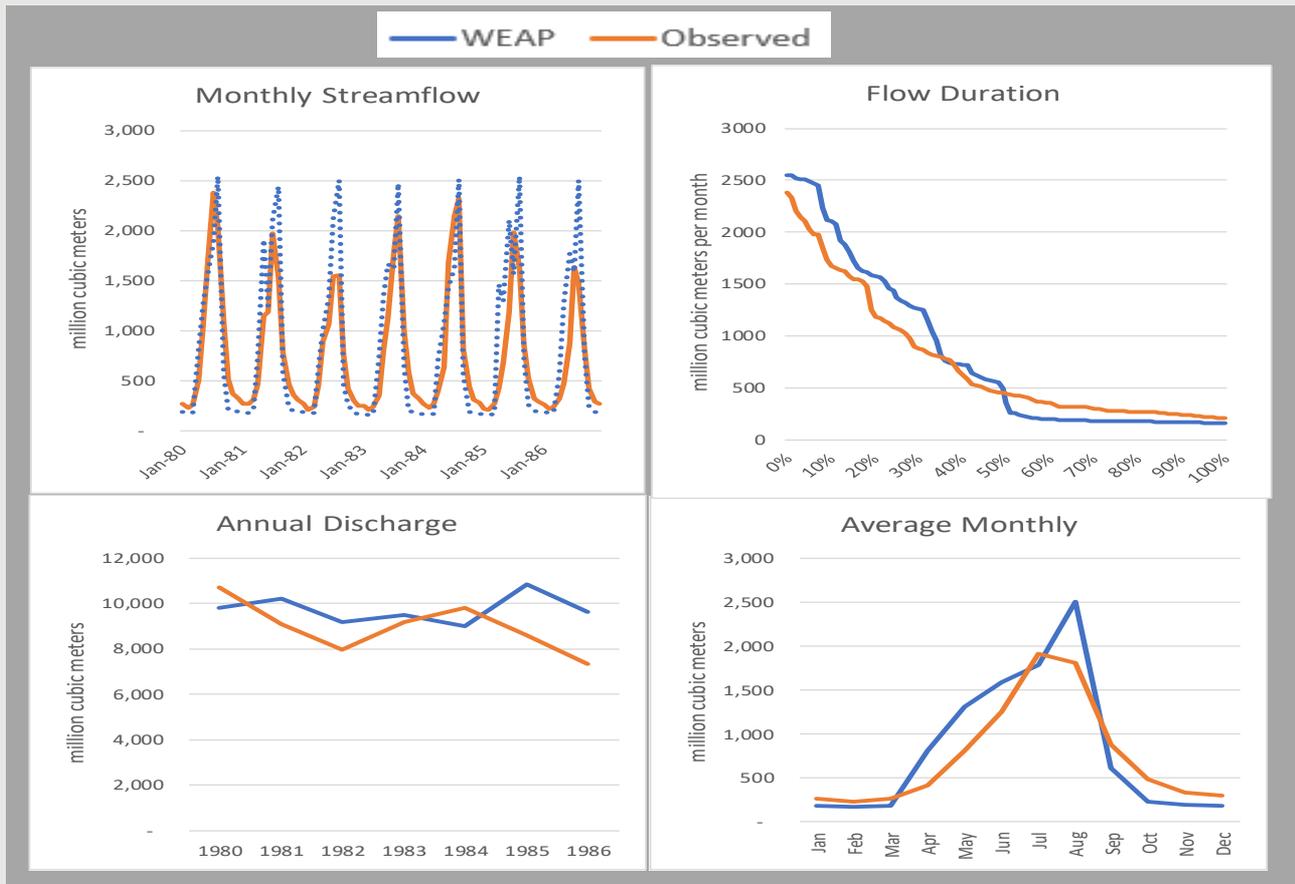


# Порядок калибровки

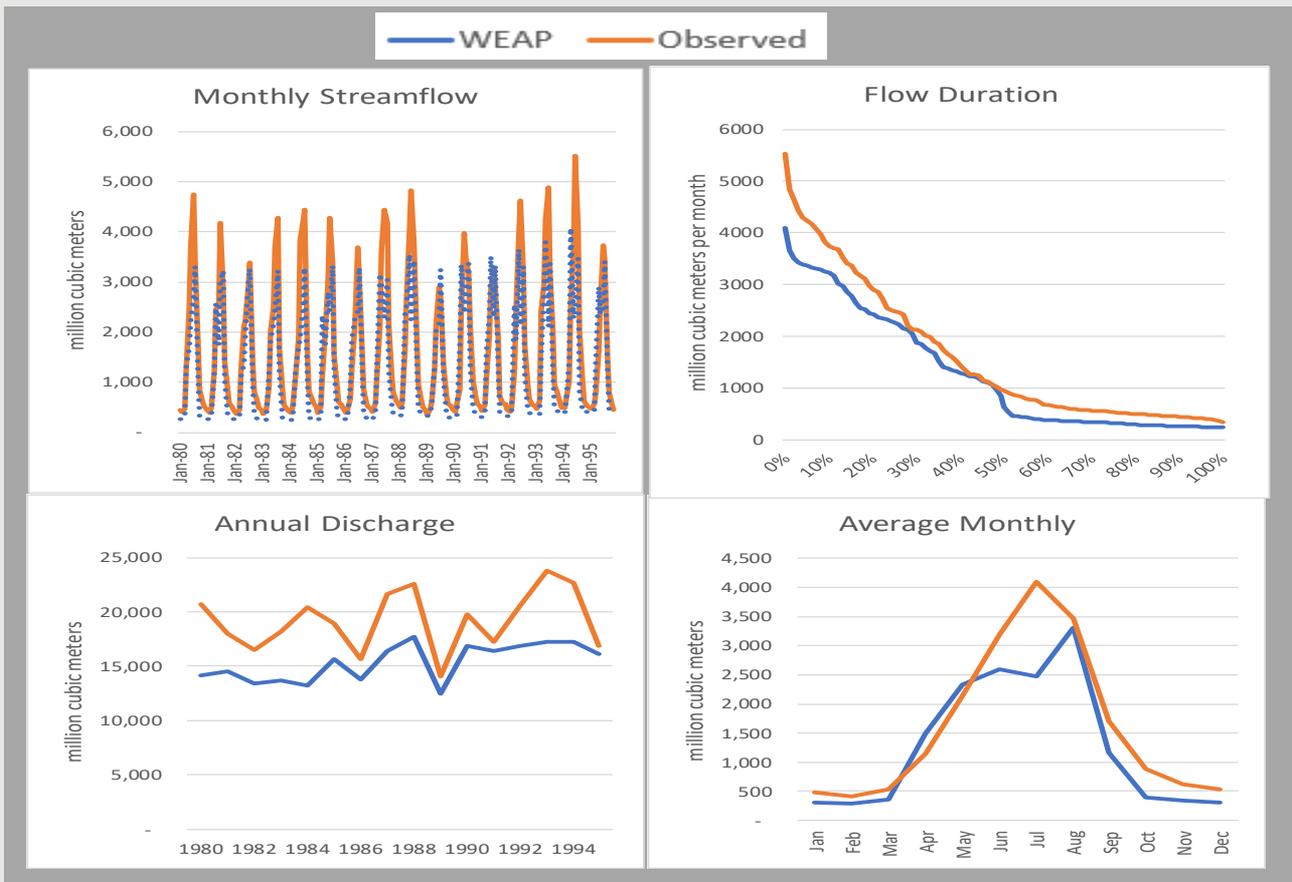
---



# Предварительные результаты – р. Кызылсу выше Рогунской ГЭС



# Предварительные результаты – р. Кашкадарья выше Гиссарека





# Ручная и автоматическая калибровка

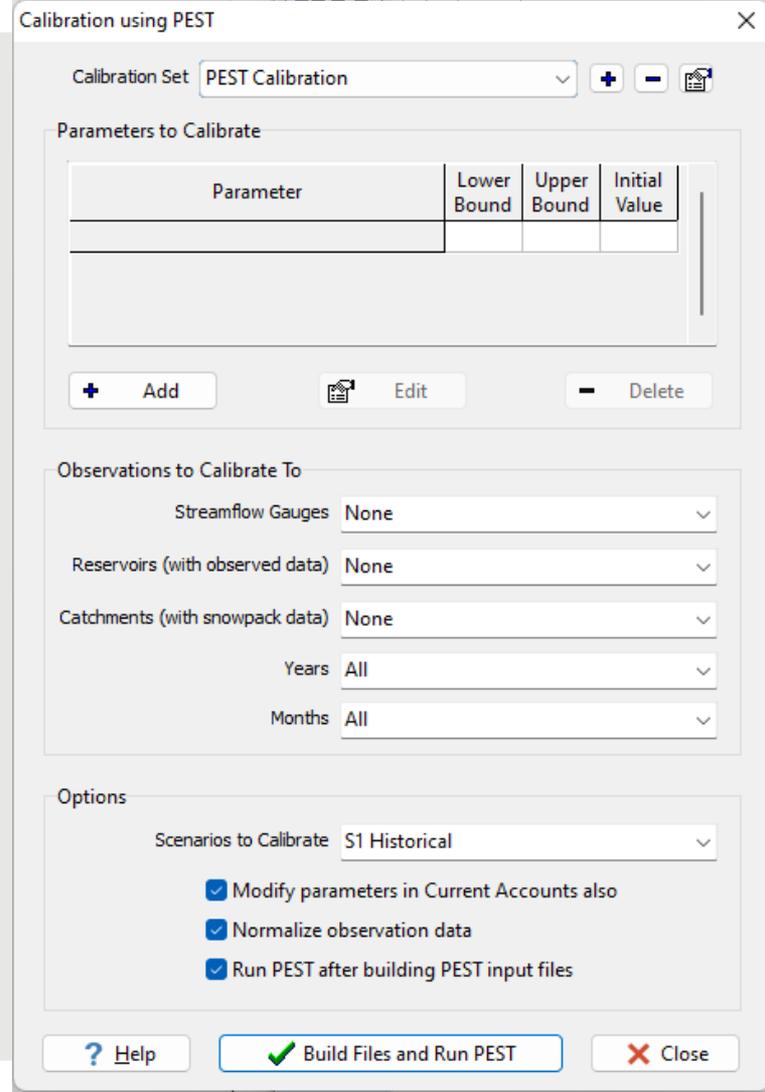
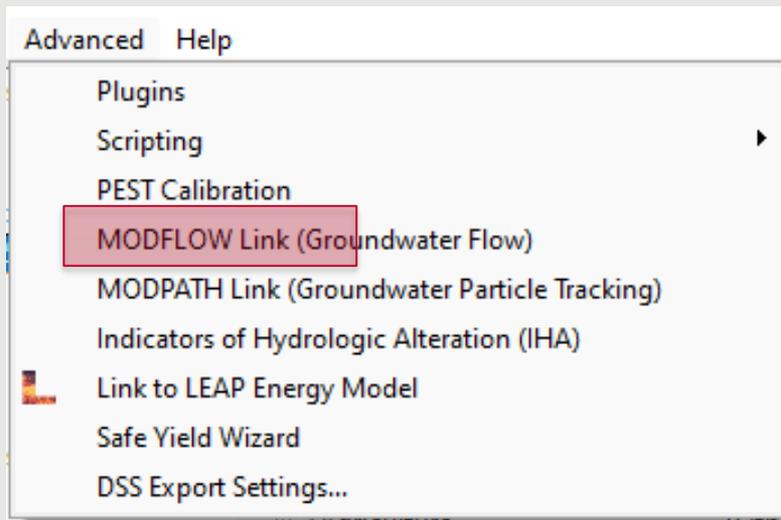
---

## Ручная и автоматическая калибровка

- Используйте ручной подход (ручная калибровка), чтобы понять, как изменения каждого параметра влияют на потоки воды в системе
  - Это важный шаг, позволяющий узнать, является ли конечный результат калибровки реалистичным
- Используйте автоматизированный подход (автокалибровка) для поиска наилучшего набора значений параметров.  
Автоматизированные подходы включают:
  - PEST (включен в WEAP)
  - Моделирование Монте-Карло
  - Генетические алгоритмы

# PEST - Инструмент оценки параметров, независимый от модели

- Расширенная функция в WEAP, позволяющая автоматизировать процесс калибровки модели



# PEST - Инструмент оценки параметров, независимый от модели

- Добавьте ключевые параметры и диапазон их значений
- Укажите, какие наблюдаемые временные ряды данных
- Укажите, какие годы и месяцы использовать при калибровке
- Дополнительные опции калибровки
  - Изменение значений в текущих расчетах или в сценарии
  - «Нормализовать» данные, чтобы все значения рассматривались одинаково (т.е. не искажать большие значения расхода)
  - Запустите PEST немедленно или пока просто создайте входной файл

Calibration using PEST

Calibration Set: PEST Calibration

Parameters to Calibrate

Parameter	Lower Bound	Upper Bound	Initial Value

+ Add   Edit   - Delete

Observations to Calibrate To

Streamflow Gauges: None

Reservoirs (with observed data): None

Catchments (with snowpack data): None

Years: All

Months: All

Options

Scenarios to Calibrate: S1 Historical

- Modify parameters in Current Accounts also
- Normalize observation data
- Run PEST after building PEST input files

? Help   Build Files and Run PEST   X Close

---

РЕГИОНАЛЬНЫЙ ПРОЕКТ USAID ПО ВОДНЫМ РЕСУРСАМ И  
ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

РУКОВОДИТЕЛЬ ПРОЕКТА – ЕКАТЕРИНА СТРИКЕЛЕВА

ул. Керей- Жанибек Хандар, д.1 В, Алматы 050051, Казахстан



DISCLAIMER: Данный продукт стал возможен благодаря поддержке американского народа через Агентство США по международному развитию (USAID). Содержание данной презентации является исключительной ответственностью компании Tetra Tech ES, Inc. и не обязательно отражает точку зрения USAID или правительства США.