



Техническая заметка: Значимость аналитических методов. Руководство по оценке изменения климата и гидрологических изменений на основе данных наблюдений

Кати Унгер-Шайесте, Ларс Герлиц, Сергей Ворогушин

Германский Центр Исследований Земли GFZ, Отдел Гидрологии, Потсдам, Германия

***Аннотация:** Важной темой журнала «Интегрированное управление водными ресурсами в Центральной Азии» является оценка прошлых и будущих изменений климата и водных ресурсов в Центральной Азии. Данная техническая заметка содержит руководство для проведения надежных оценок изменений на основе данных наблюдений, результаты которых будут публиковаться в этом журнале. Основные требования для достижения надежных результатов: (1) использование однородных рядов данных, (2) выбор соответствующих методов обнаружения изменений и (3) обсуждение результатов, их неопределенности и ограниченности. На примере анализа тренда показано, как именно неоднородность в рядах данных, выбор начальной и конечной точек временного ряда, применяемые методы и временная агрегация могут повлиять на результаты исследований изменений.*

Ключевые слова: анализ данных, неопределенность, гидрометеорология, климат

Введение

Оценка изменения климата и его влияния на водные ресурсы является одной из главных тем исследования проблем водных ресурсов в Центральной Азии. Многие исследования на эту тему были опубликованы в течение последних двух десятилетий. Для получения дополнительной информации, читатели могут обратиться к ранее опубликованным обзорным работам, которые пытаются собрать воедино результаты различных исследований в общую картину (Sorg et al., 2012; Savoskul and Smakhtin, 2013; Unger-Shayesteh et al., 2013). Тем не менее, данные обзорные статьи столкнулись с серьезным препятствием при синтезе полученных результатов в предыдущих публикациях: методологические подходы являются весьма разнообразными и часто не очень хорошо документированы, что затрудняет любое сравнение, в результате чего трудно сделать общие выводы. Данная техническая заметка нацелена на (1) демонстрацию влияния различных методов и наборов данных на полученные результаты об изменениях климата и гидрологических характеристик и (2) создание руководства для исследования изменений, которые будут публиковаться в данном новом журнале.

Основные понятия

Следующие основные понятия следует рассматривать при разработке любой методики анализа изменений.

1.1. Изменчивость и изменения

Гидрометеорологические характеристики во многих районах Центральной Азии проявляют существенную естественную изменчивость во внутригодовом и межгодовом масштабе обусловленную сильно-континентальным положением региона в средних широтах. Эту изменчивость не следует путать с «изменением», и многие исследования могут сталкиваться с проблемой отличия. Таким образом, любая оценка изменений требует анализа однородных наборов данных и более длительных периодов времени. Как правило, в зависимости от места проведения исследований и исследуемой переменной, рекомендуется выводить «среднее» состояние, т.е. состояние климата за выбранный период наблюдений, который составляет от 10 до 30 лет (WMO, 2011; ВМО, 2014). Для оценки изменений Kundzewicz и Robson (2000) рекомендуют использовать период наблюдений как минимум 50 лет.

ВМО (2014) определяет изменение климата как «статистически значимое изменение либо среднего состояния климата, либо его изменчивости, сохраняющееся на протяжении длительного периода, как правило, несколько десятилетий и больше». По аналогии это относится также и к гидрологическим изменениям. Что касается «среднего состояния», следует отметить, что многие гидрометеорологические переменные (например, осадки и речной расход в ежедневном масштабе времени) не следуют симметричному распределению, т.е. их распределение, как правило, крайне ассиметрично. Это означает, что среднее арифметическое значение не всегда является адекватной характеристикой центра распределения набора данных. В таких случаях, срединное значение или медиана, то есть значение, отделяющее верхние 50% от нижних 50% данных наблюдений в наборе данных, является более подходящей статистической величиной (ВМО, 2014, глава 4) и имеет дополнительное преимущество, заключающееся в том, что оно является более устойчивым против выбросов. Пространственное и / или временное агрегирование данных, как правило, приводит к более симметричному распределению за счет потери информации об изменчивости.

Многие явления вызваны не средним состоянием климатической системы, а его сезонной изменчивостью или дневными погодными колебаниями. Например, таяние ледников лучше характеризуется изменениями температур в субсезонном масштабе, чем средними годовыми изменениями температуры. Чтобы исследовать изменения в паводковых и меженных стоках, должны быть рассмотрены высокие и низкие процентиля речного стока. Таким образом, временной масштаб и

статистические показатели исследуемых переменных должны быть выбраны тщательно, в зависимости от цели, для которой проводится интерпретация результатов.

1.2. Неопределенность

Любые климатологические и гидрологические измерения связаны с неопределенностью (WMO, 2008 / ВМО, 2011). В общую неопределенность измерений вносят вклад различные источники, среди них - точность датчиков, точность измерения, а также систематические ошибки в процедуре измерения (например, недостаточное улавливание атмосферных осадков из-за ветра), ошибки представления данных, пространственная и временная ограниченность измерений (т.е. репрезентативность). Во время обработки данных, неопределенности передаются от одного шага к другому, а также возникают новые источники неопределенности, в результате чего неопределенность увеличивается (например, из-за предположений, лежащих в основе определенных статистических выводов, выбора статистических показателей и периодов изучения, и т.д.). Следовательно, любое исследование климатических и гидрологических изменений должно провести оценку неопределенности, т.е. насколько можно доверять данным и результатам оценки изменений. Эта оценка имеет большое значение для принятия обоснованных решений.

Используемые данные

1.3. Результаты наблюдения станций

Обнаружение климатических и гидрологических изменений опирается на набор данных наблюдений, который отвечает следующим требованиям (Unger-Shayesteh и др. 2013):

- Ряды данных наблюдений должны быть однородными (или гомогенизированными исследователем). Неоднородности могут возникать из-за изменений места расположения станции или ее окружения, а также изменений в методах измерения или интервалов замеров. Для получения подробной информации об изменениях в методике измерений читателям рекомендуется ознакомиться с трудами Groisman и др. (1991) по вопросам измерения атмосферных осадков, и National Climate Data Center (2003) по вопросам измерения температуры воздуха. WMO (2003 г.) предлагает ряд тестов на однородность и обсуждает подходы к гомогенизации данных. Пример 1, приведенный ниже, показывает, как неучтенные неоднородности могут исказить результаты оценки изменений.
- Известные ошибки, такие как ошибки при кодировании, а также опечатки, должны быть исправлены. Это включает в себя также исправление систематических ошибок измерений, таких как недостатки улавливания

осадкомера из-за ветра и твердых осадков. Groisman и Rankova (2001) обсуждают поправочные коэффициенты с акцентом на методы измерений используемых в бывшем СССР.

- Данные наблюдений станций должны быть репрезентативными для исследуемого явления. На результаты наблюдений влияют многие факторы, такие как расположение станции (например, высота, экспозиция) или окружение станции (например, увеличивающаяся урбанизация, орошаемые территории). В зависимости от задач исследования, данные с различных станций могут быть не в состоянии раскрыть интересующий феномен, особенно, если оценка основана на сравнении данных со станций, на которые влияли различные факторы.

1.4. Растровые данные

Многие исследования воздействия изменений климата - в частности, в области гидрологии и геоэкологии - требуют пространственных климатических данных (в отличие от точечных данных станций). За последние два десятилетия, все чаще становятся доступны глобальные растровые данные, которые в перспективе представляют собой дополнительные источники данных для таких регионов, как Центральная Азия характеризующихся малодоступностью данных измерений. Здесь мы приводим краткий обзор доступных наборов данных, их преимущества и недостатки, без каких-либо претензий на полноту информации. В зависимости от метода их приведения, растровые климатические данные могут быть сгруппированы в три категории: (1) наборы растровых данных полученные путем стационарных наблюдений и интерполяции, (2) данные основанные на спутниковых наблюдениях и (3) результаты реанализа. Каждая из категорий имеет свои сильные и слабые стороны. Алгоритмы интерполяции на регулярную сетку используют традиционные методы или геостатистические методы для получения непрерывных полей переменных климатических переменных на основе данных измерений на станциях. Широко применяются такие наборы данных, как, например, CRU (Подразделение климатических исследований) (Harris и др., 2014), worldclim (Hijmans и др., 2005), APHRODITE (Yatagai и др., 2012), GPCC (Глобальный климатический центр исследования атмосферных осадков) (Schneider и др., 2015). Качество этих наборов данных в значительной степени зависит от количества рассматриваемых станций. Несколько исследований рассматривали глобальные оценки атмосферных осадков в Центральной Азии (подробнее см. Unger-Shayesteh и др., 2013). В ходе проведения данных исследований было установлено, что данные реанализа Глобального климатического центра исследования (GPCC Full data reanalysis) и данные APHRODITE показали наилучшие результаты; скорее

всего, это обусловлено большим числом используемых станций. Также данный факт было недавно подтвержден Malsy и др. (2015).

Растровые данные первой группы, основанные на интерполяции станционных данных, как правило, имеют пространственное разрешение $0,5^\circ$ широты / долготы или ниже, однако большинство из алгоритмов интерполяции рассматривает только широту, долготу и высоту в качестве независимых предикторных переменных, при этом, не учитывая важных топографически обусловленных климатических процессов, таких как наветренное и подветренное расположение склона, и связанной с ними пространственной изменчивости интенсивности осадков в высокогорных условиях (Soria-Auza и др., 2010). Кроме того, используемые данные наблюдений являются территориально необъективными (большинство станций расположены на низких высотах), что приводит к недостаточной представленности высокогорных районах (Gerlitz и др., 2014). Таким образом, такие данные климатической оценки высокого разрешения, как worldclim, следует использовать с осторожностью. Поскольку растровые данные основаны на точечных данных измерений, методологические ограничения станционных данных также должны быть рассмотрены в контексте использования растровых данных. Настоятельно рекомендуется оценить однородность и репрезентативность данных перед их применением для оценки воздействия изменений климата.

Растровые данные второй группы, основанные на спутниковом наблюдении, главным образом используют данные радиолокационных снимков, инфракрасных и пассивных микроволновых наблюдений в целях выявления температур на верхней границе облаков и оптической толщины атмосферы, а также для оценки локальных или региональных осадков. Методика определения значений параметров, как правило, откалибрована для конкретных регионов и, следовательно, не может быть постоянной во времени и пространстве. Кроме того, тот факт, что в большинстве регионов спутниковые снимки производятся лишь один или два раза в день, может привести к потере данных о краткосрочных осадках. Таким образом, современные оценки, основанные на получении данных со спутников, таких как TRMM (спутник для измерения количества осадков в тропиках) (Huffman и др., 2007) и GPCP (Глобальный проект в области климатологии осадков) (Adler и др., 2012) также используют дополнительно данные станций наблюдения. Guo и др. (2015) обнаружили, что TRMM при использовании коррекции основанной на данных осадкомеров адекватно отражает пространственную и временную изменчивость осадков в Центральной Азии, в то время как использование только спутниковых данных имеет тенденцию к значительному преувеличению количества атмосферных осадков. Поскольку спутниковые данные стали доступны только после 1980 года приведенные данные на их основе, как правило, не подходят для оценки климатических тенденций.

Третий тип растровых данных представляет собой результаты так называемого реанализа. Наборы данных, такие как ERA-Interim (Berrisford и др., 2009), NCEP (Национальный центр экологических прогнозов) / NCAR (Национальный центр по исследованию атмосферы) (Kalnay и др., 1996) или MERRA (Rienecker и др., 2011) широко применяются в недостаточно освещенных районах. Эти данные являются результатом использования глобальных климатических моделей объединенных с локальными наблюдениями и данными дистанционного зондирования с использованием подхода ассимиляции данных. Сочетание физически обоснованных климатических моделей и атмосферных наблюдений позволяет оценить крупномасштабные погодные и климатические условия в течение последних десятилетий. В частности, данные реанализа включают полный набор физических и пространственно согласованных переменных, что является преимуществом для многих исследований воздействия изменений климата. Некоторые исследования показывают, что продукты реанализа, особенно ERA-Interim, достаточно точно отображают пространственную и временную изменчивость климата в Центральной и Верхней Азии (Schiemann и др., 2008; Wang и Zeng, 2012; Bao и Zhang, 2013), хотя некоторые исследования показывают, что температурные тенденции в основном недооцениваются в данных реанализа (Hasson и др., 2015; Frauenfeld и др., 2005). Кроме того, в зависимости от метода ассимиляции, данные реанализа могут быть менее пригодны для анализа долговременных изменений в связи с разным количеством станций и спутниковых данных, используемых в различные периоды в процессе ассимиляции. Это вызывает несоответствия и может исказить фактические тенденции (Bengtsson и др., 2004). Также топографическая неоднородность высокогорных районов неадекватно отображается современными методами реанализа из-за ограниченного пространственного разрешения климатических моделей, составляющего от 1 до 2,5° широты / долготы. Таким образом, данные реанализа репрезентативны лишь для широкомасштабных регионов (протяженностью несколько сотен километров). В региональном и локальном масштабе данные повторного анализа, как правило, характеризуются систематическими ошибками, связанными с упрощенной топографией и, таким образом, не являются надежными без последующего статистического или динамического скалирования (Gerlitz и др., 2015; Gerlitz и др., 2014).

Мы рекомендуем выбрать подходящие растровые данные в зависимости от цели исследования, пространственной протяженности и топографических характеристик исследуемой области. Недостатки различных растровых данных (временная неоднородность, низкое разрешение) должны в конечном итоге быть учтены для интерпретации результатов исследований.

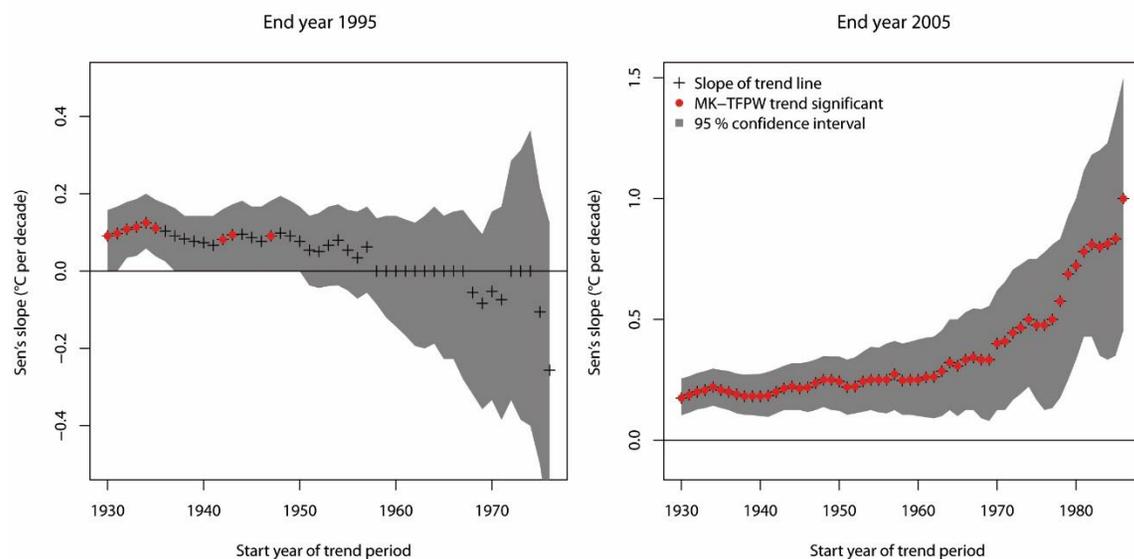
Примеры

В следующем разделе выбранные примеры должны продемонстрировать, как данные и методы влияют на результаты анализа тенденций на станциях мониторинга Центральной Азии.

1.5. Пример 1: Тенденция изменения среднегодовой температуры воздуха на станции Тянь-Шань - эффект неоднородности данных

Unger-Shayesteh и др. (2013) продемонстрировали чувствительность оценки тенденции в зависимости от выбора начального и конечного года временного ряда. Они провели анализ тенденций с помощью метода Манн-Кендалла для данных среднегодовой температуры воздуха на станции мониторинга Тянь-Шань. Как видно из рисунка 1, рассчитанные тенденции в значительной степени зависят от выбранных периодов изучения. Выбор начального и конечного года не только влияет на статистическую значимость тренда, но и на его направление и величину (Рисунок 1а).

В случае станции Тянь-Шань, неоднородность данных существенно усиливает этот эффект (Рисунок 1б). Обычная неавтоматизированная станция находилась в эксплуатации до 1996 года после чего она была перемещена и заменена новой автоматической метеостанцией (см. Unger-Shayesteh и др., 2013, Приложение 1). Как видно исходя из рисунка 1, совмещение данных температуры воздуха предоставленных неавтоматизированной станцией с данными полученными автоматической метеостанцией после 1997 года без проведения гомогенизации приводит к переоценке тенденции температуры за весь период изучения. Это не должно толковаться как изменение температуры, так как в первую очередь это является эффектом использования несогласованного временного ряда.



(а) Влияние выбранного периода

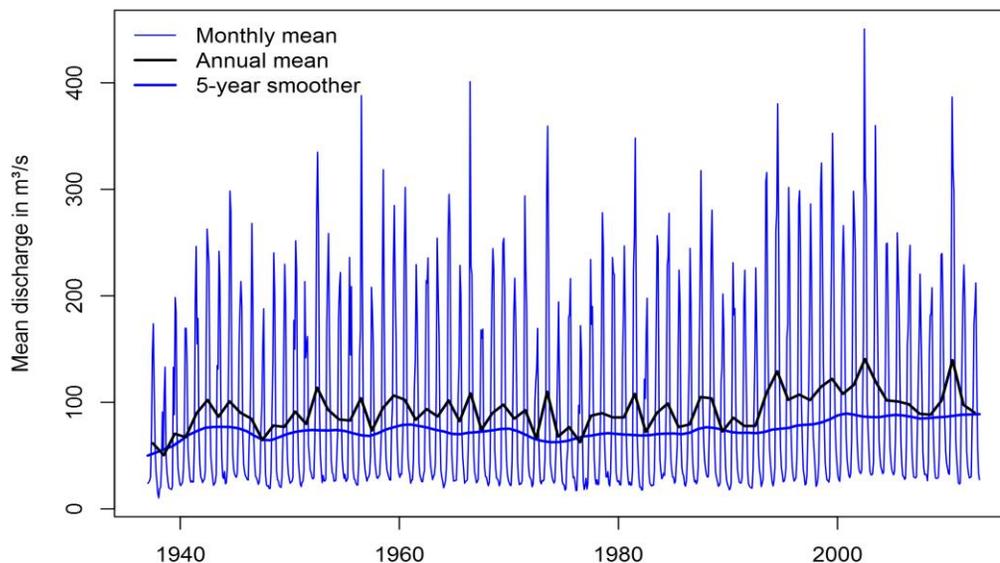
(б) Эффект неоднородности данных

Рисунок 1. Тенденция изменения среднегодовой температуры воздуха на станции Тянь-Шань. (а) для конечного года 1995. (б) конечного года 2005 (то есть после переноса станции). Красные точки отмечают значимость тенденции на начало соответствующего года. Черные кресты и область, выделенная серым цветом, указывают угол прямой наклона Сена как оценку тенденции и его доверительный 95 % интервал (вычисляется с помощью R и пакета zup).
(Перепечатано из Global and Planetary Change, Vol. 110, Part A, Unger-Shayesteh et al., 2013, стр. 4–25, Copyright (2013), с разрешения Elsevier.)

1.6. Пример 2: Тренды расходов воды на гидропосте г. Нарын - Эффекты выбранного подхода

Для изучения гидрологических изменений в бассейне реки Нарын за последние десятилетия, мы исследуем тренды расходов воды в долгосрочном периоде на гидропосте Нарын. Ежемесячные данные наблюдений в течение 76 лет были получены от Кыргызгидромета, который является оператором гидропоста. Мы хотели бы использовать полный набор данных (912 наблюдений, рисунок 2) для оценки тенденций и найти общую тенденцию за весь период времени.

River discharge in Naryn 1937-2012



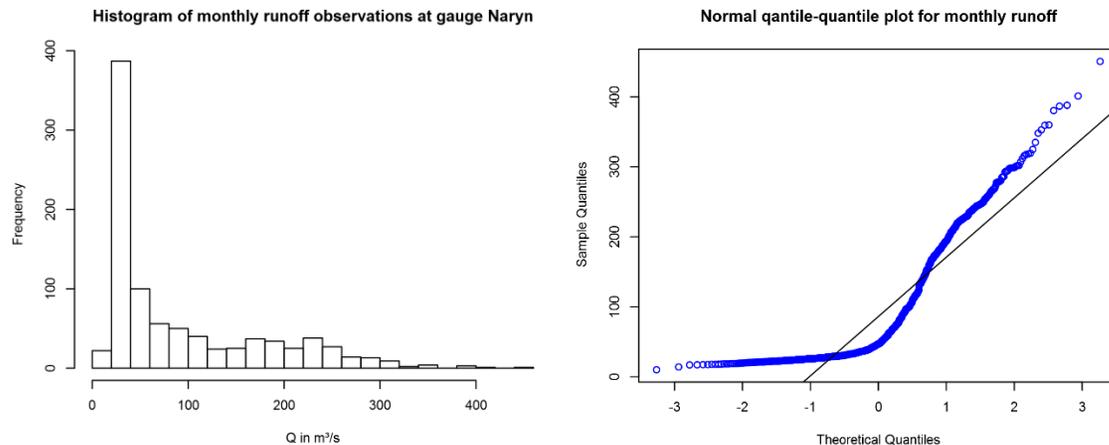


Рисунок 2. Временные ряды среднемесячного и годового речного стока на гидропосте Нарын за период 1937-2012. Дополнительно к ряду ежемесячных данных представляются ряд среднегодового стока и результат локально-взвешенной полиномиальной линейной регрессии с 5-летним сглаживателем (верхняя панель). Аналитические графики для проверки распределения ежемесячных данных по стоку (нижняя панель).

Как подавляющее большинство гидрологических переменных, наблюдения среднемесячного речного стока на гидропосте Нарын, не соответствует нормальному Гауссовому распределению. Вместо этого, распределение данных имеет явную асимметрию и тяжелый хвост по направлению к максимальному стоку (рис 2). Это означает, что статистические заключения, опирающиеся на допущение о нормальном распределении, не могут дать правильные результаты. Кроме того, ежемесячные ряды показывают сильную сезонность, что приводит к высокой автокорреляции с интервалом запаздывания 1 ($AR(1) = 0,7$), и с интервалами запаздывания кратных 12 ($AR(m \cdot 12) > 0,5$) за весь период наблюдений.

Для анализа тенденции сначала мы исключим сезонную составляющую ряда данных путем вычитания долгосрочного срединного значения (медианы) для каждого месяца от каждого отдельного значения месячного стока. Срединное значение было выбрано, поскольку распределение не является симметричным, и, следовательно, срединное значение является более устойчивой оценкой центрального значения, чем среднее значение. Полученные аномалии показывают симметричное распределение с все же четко различимыми хвостами, и характеризуются остаточной автокорреляцией с интервалом запаздывания lag-1 $AR(1)$ в размере 0,4.

В соответствии с рекомендацией Kundzewicz и Robson (2000), мы проводим различные статистические тесты для проверки общей тенденции в ряде данных. Таблица 1 и Рисунок 3 содержат список применяемых методов и результатов. Акцент был сделан на непараметрические методы, которые не имеют никаких требований в отношении статистического распределения данных. Примером теста тенденций является тест Манн-Кендалла (Mann, 1945), широко используемый в

области экологических наук вместе с углом наклона прямой Сена (Sen, 1968) для оценки значимости и величины тренда. Так как исходные ежемесячные наблюдения содержат сильную сезонную составляющую, мы использовали Сезонный тест тенденций Манн-Кендалла (Hirsch и Slack, 1984), чтобы оценить общую тенденцию в исходной серии и проверить ее статистическую значимость. Кроме того, мы применили обычный тест Манн-Кендалла к исходному ряду данных и использовали схемы повторной выборки, чтобы оценить статистическую значимость тенденции. Повторная выборка сохраняет сезонную структуру серии путем случайного выбора связанных частей данных с заменой («бутстрэп») или без замены («перестановка»), вычисляя статистический критерий и сравнивая его со статистическим критерием исходной серии. Схемы повторной выборки, используемые в нашем случае с целью сохранения сезонной структуры, были (1) блочный бутстрэп с размером блока в 12 месяцев, (2) круговая перестановка («Метод временных рядов» по Simpson, 2015, которая сдвигает начальные и конечные точки временного ряда), и (3) перестановка с размерами блоков в 12 месяцев («Метод делянки» по Simpson, 2015).

Следующий набор методов применяется к ряду ежемесячных аномалий. Ряд аномалий по-прежнему содержит статистически значимую автокорреляцию с интервалом запаздывания 1. Поскольку такая автокорреляция может привести к завышенной оценке тенденции, желательно использовать подходы с предварительным «отбеливанием», которые убирают автокорреляцию с интервалом запаздывания-1 итеративным путем. Тенденция затем вычисляется для полученного ряда без автокорреляции с интервалом запаздывания-1.

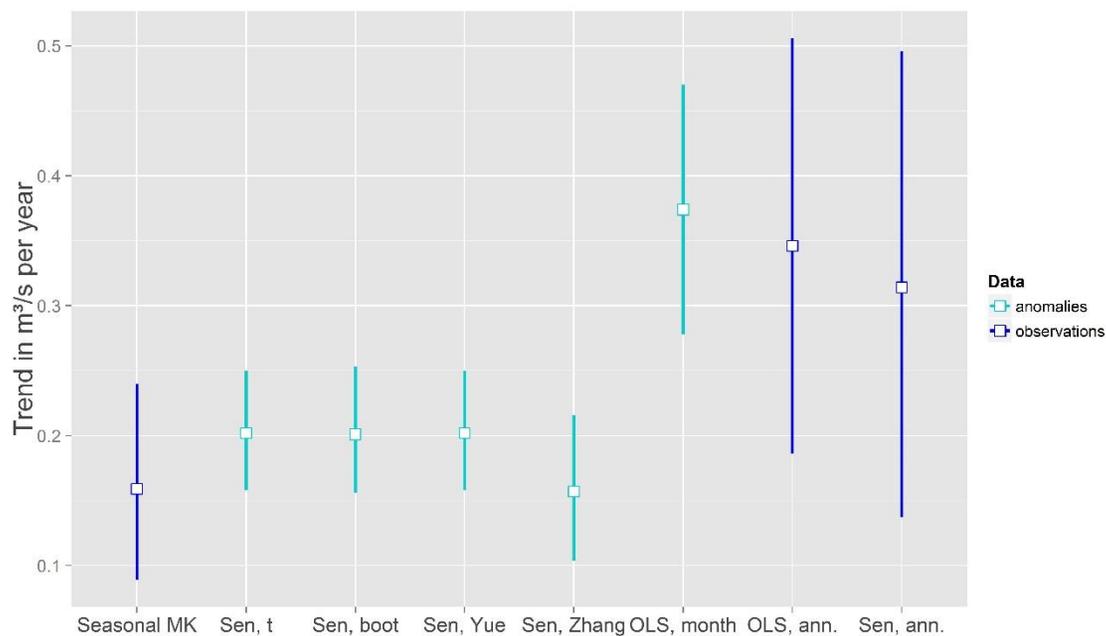


Рисунок 3. Результаты тенденции для ежемесячного и ежегодного рядов данных речного стока на гидропосте Нарын за период 1937-2012. Все тенденции являются статистически значимыми на уровне 1%. Линии отмечают доверительный 95% интервал величины тенденции. Для сравнения, тенденции для агрегированной серии ежегодных значений отображаются в двух сегментах справа.

Таблица 1. Список тестов для определения значимых тенденций примененных к ряду данных речного стока в реке Нарын и их результаты.

Метод	Данные	Пакет / функция R	Тенденция (доверительный 95% интервал), уровень значимости α	
Тест сезонных тенденций Манн-Кендалла, с корректировкой автокорреляции, и угол наклона Сена	Ежемесячные наблюдения	EnvStats / kendallSeasonalTrend Test ()	0.159 (0.089, 0.240)	0.01
Тест тенденций Манн-Кендалла и угол наклона прямой Сена	Ежемесячные наблюдения			
(a) Исходный тест		Kendall / MannKendall()		0.01
(b) Предварительное отбеливание, не зависящее от тенденций по Yue и др., 2002		zyp / zyp.yuepilon()	0.135 (0.059, 0.223)	0.01
(c) Бутстрэп с размером блока $bl=12$, 1000 репликаций		Boot / tsboot()		0.01
(d) Перестановка в блоках с размером блока $bl=12$, 1000 перестановок		Permute()		0.01
(e) Круговая перестановка		Permute()		0.05
Тест тенденций Манн-Кендалла и угол наклона прямой Сена	Ежемесячные аномалии			
(a) Значимость тенденции		Kendall / MannKendall()		0.01
(b) Доверительный		zyp / zyp.sen()	0.202 (0.158, 0.250)	

интервал угла наклона прямой Сена на основе t статистики				
(с) Бутстрэпированный доверительный интервал угла наклона прямой Сена, 5000 репликаций (BCa)		boot / boot(), ts(boot)	0.201 (0.156, 0.253)	
(d) Предварительное отбеливание по Zhang и др., 2000		Zyp / zyp.zhang()	0.157 (0.104, 0.216)	0.01
(е) Предварительное отбеливание, не зависящее от тенденций по Yue и др., 2002		Zyp / zyp.yuepilon()	0.202 (0.158, 0.250)	0.01
Обычный метод наименьших квадратов	Ежемесячные аномалии	Stats / lm()	0.374 (0.278, 0.470)	0.01
	Ежегодные наблюдения	Stats / lm()	0.346 (0.186, 0.506)	0.01
Тест тенденций Манн-Кендалла и угол наклона прямой Сена	Ежегодные наблюдения	zyp / zyp.sen	0.314 (0.137, 0.496)	0.01

Очевидно, что данная величина тенденции зависит от используемого метода. Оценка угла наклона прямой Сена дает величину тенденции $\approx 0,2 \text{ м}^3 / \text{с}$ в год. Результаты для различных методов, основанных на оценке угла наклона прямой Сена и ежемесячных наблюдениях или аномалиях находятся в хорошем соответствии, а их доверительные интервалы показывают значительное совпадение. Тем не менее, оценка на основе значимости метода наименьших квадратов (МНК/OLS) дает величину тенденции вдвое большую, чем по методу угла наклона прямой Сена. Данный факт может быть результатом более высокой чувствительности значимости МНК к экстремальным значениям в начале и в конце временного ряда, и результатом не принимания во внимание автокорреляции, все еще присущей ряду аномалий. Как правило, метод наклона прямой Сена менее чувствителен к выбросам, т.е. является более устойчивым по сравнению со МНК. Таким образом, он стал современным стандартом в области методик для анализа тенденций в сочетании с тестом значимости Манн-Кендалла в гидроклиматологии и экологии. Рисунок 3 также показывает, что величина тенденции для временно агрегированных значений, например, годовых значений, выше, чем для ежемесячных значений, поскольку изменчивость годовых данных меньше. В то же

время, доверительный интервал / неопределенность становятся больше при агрегации, что является эффектом меньшего объема выборки.

1.7. Пример 3: Тенденции в среднегодовом значении речного стока в Нарыне - влияние выбранного периода исследования

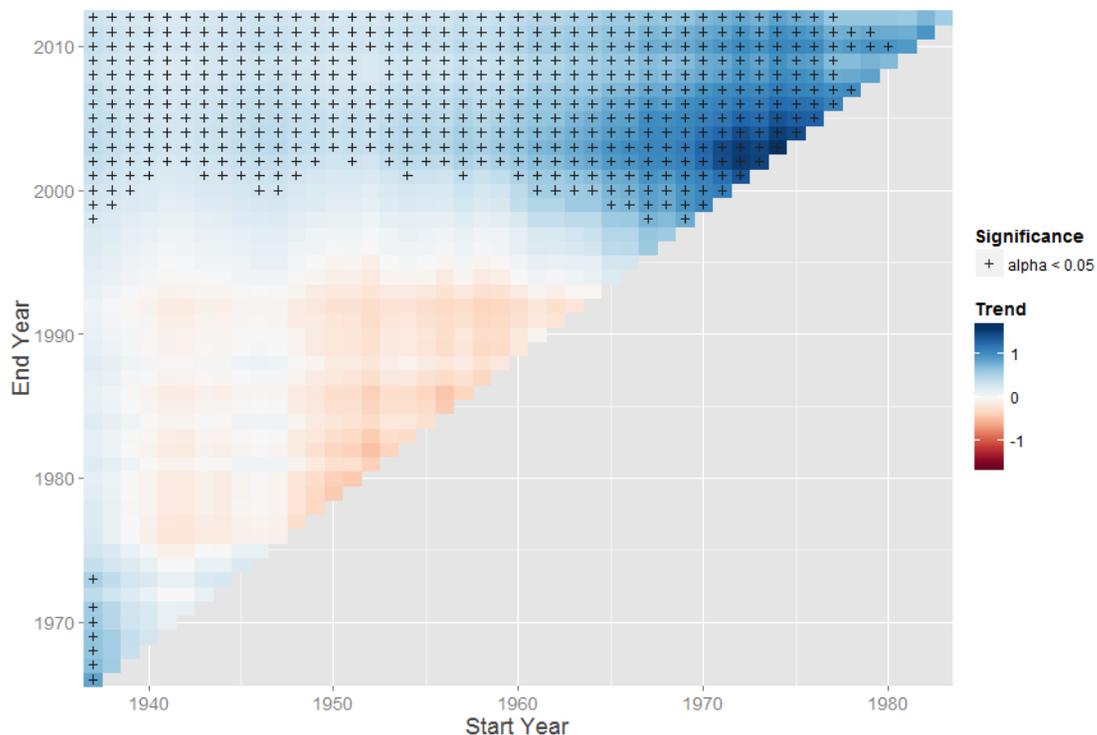


Рисунок 4. Временная изменчивость тенденций в среднегодовом речном стоке на станции Нарын. Тенденции были рассчитаны на основе как минимум 30-ти летнего периода наблюдений. Величина тенденции получена по углу наклона прямой Сена. Значимость тенденции рассчитана с использованием теста тенденций Манн-Кендалла с использованием предварительного отбеливания, не зависящего от тенденций по Yue и др. (2002).

Как показано в примере 1 для температуры на станции Тянь-Шань, результаты тенденций изменяются в зависимости от выбранных начального и конечного года временного ряда (рисунок 1). Полезным методом для анализа тенденций и получения целостной картины временных изменений с учетом различных начальных и конечных точек является так называемый составной график тенденций (рисунок 4). Применительно к среднегодовому речному стоку на станции Нарын, составной анализ тенденций показывает негативные тенденции в период 1940-1990-х годов, в то время как положительная тенденция наступает после 1970-х годов и является статистически значимой на 5% уровне.

Выводы

Несмотря на то, что подробное обсуждение методов оценки изменений выходит за рамки этой технической заметки, данные примеры показывают, что результаты исследований климатических и гидрологических изменений очень чувствительны к основным наборам данных и выбранным методологическим подходам. Таким образом, описание и обсуждение используемых данных и применяемых методов является основным требованием для любого исследования, которое будет опубликовано в данном журнале. Это включает в себя:

- Описание источников данных и обсуждение репрезентативности, однородности и неопределенности исходных данных и их пригодности для конкретного исследования;
- Подробное описание методологических подходов, обсуждение ограничений выбранных методов, в том числе включение проверки обоснованности предварительных допущений (например, требование симметричного распределения рядов данных в статистическом анализе);
- Обсуждение и, если возможно, количественное определение неопределенности результата.

Представленный анализ должен соответствовать критериям воспроизводимости, что означает, что данные и методы должны быть описаны таким образом, что воспроизведение полученного результата является возможным другими учеными, если это необходимо. Этот факт является ключевым условием для прозрачных научных заключений и дальнейшего научного прогресса.

Везде где возможно, рекомендуется применять различные методы и наборы данных, чтобы продемонстрировать устойчивость выводов, т.е. получение последовательных результатов, используя различные методологические подходы. Аналитические графики, такие как несколько графиков тенденций, представленных на рисунках 1 и 3, или региональные карты, могут помочь в понимании пространственно-временной изменчивости изменений и подчеркивают устойчивость изменений, обнаруженных в течение выбранного периода исследований или исследуемого региона.

При подведении результатов, авторы должны (1) избегать сверхообобщения с учетом естественной пространственно-временной изменчивости и (2) различать индикации, свидетельства и доказательства. Kundzewicz и Robson (2000) отмечают, что статистические тесты предоставляют свидетельства, а не доказательства. Кроме того, авторы должны проявлять разумную осторожность при определении причинно-следственных связей между наблюдаемыми изменениями и конкретными факторами. Они должны четко различать «мягкое» (логичное, но гипотетическое) и «жесткое» определение (Merz и др., 2012). Жесткое определение исключает влияние других факторов изменений. На самом деле, многие факторы

могут действовать на естественную экосистему, частично противодействуя друг другу, и, таким образом выявление и количественное определение причин изменения зачастую гораздо сложнее, чем это может показаться на первый взгляд. Данная техническая заметка не может обеспечить обширный обзор и подробное обсуждение всех доступных методов для оценки климатических и гидрологических изменений. Для получения дополнительной информации, читатели могут ознакомиться с современными методологическими пособиями и научными статьями. Полезные рекомендации по оценке изменений даются в некоторых публикациях, находящихся в открытом доступе в сети Интернет, среди них присутствуют рекомендации ВМО (WMO, 2011; ВМО, 2014), а также Kundzewicz и Robson (2000). Для обширного анализа изменений, настоятельно рекомендуется использование статистических пакетов программного обеспечения, например, свободно доступная программная среда R с открытым исходным кодом (www.r-project.org) и продвинутым пользовательским интерфейсом (например, www.rstudio.com). Тренинги в области использования R все чаще предлагаются различными международными организациями и проектными консорциумами также и в Центральной Азии.

Дополнения

Для справки, код R, использующийся для данной технической заметки, опубликован в приложении.

Библиография

- Adler R., Guojun Gu, Huffman G., 2012. Estimating Climatological Bias Errors for the Global Precipitation Climatology Project (GPCP). *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 51, 84–99. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/JAMC-D-11-052.1>
- Bao, X, Zhang, F., 2013. Evaluation of NCEP/CFRSR, NCEP/NCAR, ERA-Interim and ERA-40 Reanalysis datasets against independent sounding observations over the Tibetan Plateau. *J Clim* 26: 206-214.
- Bengtsson, L., K. I. Hodges, et al. (2004). "Sensitivity of the ERA40 reanalysis to the observing system: determination of the global atmospheric circulation from reduced observations." *Tellus Series a-Dynamic Meteorology and Oceanography* 56(5): 456-471.
- Berrisford, P., Dee, D., Fielding, K., M. Fuentes, P. Kallberg, S. Kobayashi and S. Uppala, 2009. The ERA-Interim Archive. In: ERA Report series, no. 1. <http://old.ecmwf.int/publications/library/do/references/show?id=89203>. Accessed 12 Nov 2015
- Frauenfeld OW, Zhang T, Serreze MC, 2005. Climate change and variability using European Centre for Medium-Range Weather Forecasts reanalysis (ERA-40) temperatures on the Tibetan Plateau. *J Geophys Res* 110: D02101, doi: 10.1029/2004JD005230

- Gerlitz L., 2014. Using fuzzyfied regression trees for statistical downscaling and regionalization of near surface temperatures in complex terrain. *Theoretical and Applied Climatology*, Online First, Vol. 118, doi: 10.1007/s00704-014-1285-x
- Gerlitz L., Conrad O., Böhner J., 2015. Large scale atmospheric forcing and topographic modification of precipitation rates over High Asia - a neural network based approach. *Earth System Dynamics* 6, 61-81
- Groisman, P. Y., Koknaeva, V. V., Belokrylova, T. A., and Karl, T. R., 1991. Overcoming biases of precipitation measurement - A history of the USSR experience. *Bulletin of the American Meteorological Society* 72 (11): 1725-1733.
- Groisman, P. Y., and Rankova, E. Y., 2001. Precipitation trends over the Russian permafrost-free zone: Removing the artifacts of pre-processing. *International Journal of Climatology* 21 (6): 657-678.
- Guo, H.; Chen, S.; Bao, A.; Hu, J.; Gebregiorgis, A.S.; Xue, X.; Zhang, X., 2015. Inter-Comparison of High-Resolution Satellite Precipitation Products over Central Asia. *Remote Sens.* 7, 7181-7211.
- Harris, I., Jones, P.D., Osborn, T.J. and Lister, D.H., 2014. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations – the CRU TS3.10 Dataset. *Int. J. Climatol.*, 34: 623–642. doi: 10.1002/joc.3711
- Hasson S., Gerlitz, L., Böhner, J., 2015. Recent Climate Change in High Asia. In: Schickhoff, U. & Mahal, S.: *Impact of climate change on Glaciers and Vegetation in the Himalayas*. Springer. In press.
- Hijmans, R.J., S.E. Cameron, J.L. Parra, P.G. Jones and A. Jarvis, 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *Int. J. Climatol.* 25: 1965-1978.
- Hirsch, R. M., and Slack, J. R., 1984. A nonparametric trend test for seasonal data with serial dependence. *Water Resources Research* 20 (6): 727-732.
- Huffman G., Bolvin D., Nelkin E., Wolff D., Adler, R. F., Guojun Gu, Yang Hong, Bowman, K. P., and Stocker, E. F., 2007. The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-Global, Multiyear, Combined-Sensor Precipitation Estimates at Fine Scales. *J. Hydrometeor.* 8, 38–55. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/JHM560.1>
- Kalnay E, M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins, D. Deaven, L. Gandin, M. Iredell, S. Saha, G. White, J. Woollen, Y. Zhu, A. Leetmaa, R. Reynolds, M. Chelliah, W. Ebisuzaki, W. Higgins, J. Janowiak, K. C. Mo, C. Ropelewski, J. Wang, Roy Jenne, and Dennis Joseph, 1996. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77, 437–471. doi: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0477\(1996\)077](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0477(1996)077)
- Kundzewicz, Z., and Robson, A., 2000. Detecting Trend and Other Changes in Hydrological Data. World Meteorological Organization, eds. *World Climate Programme, Data and Monitoring, Water, WCDMP-45, WMO/TD no. 1013*. Geneva, Switzerland.
- Malsy, M., Beek, T. a. d., and Flörke, M., 2015. Evaluation of large-scale precipitation data sets for water resources modelling in Central Asia. *Environmental Earth Sciences* 73 (2): 787-799.
- Mann, H. B., 1945. Nonparametric tests against trend. *Econometrica* 13 : 245-259.

- Merz, B., Vorogushyn, S., Uhlemann, S., Delgado, J., and Hundedcha, Y., 2012. HESS Opinions 'More efforts and scientific rigour are needed to attribute trends in flood time series'. *Hydrology and Earth System Sciences* 16 (5): 1379-1387. Available at: www.hydrol-earth-syst-sci.net/16/1379/2012/hess-16-1379-2012.html
- National Climatic Data Center, 2003. Daily temperature and precipitation data for 223 USSR stations (DSI-9806A). Data Documentation for data set 9806A. 16 p. Available at: <ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/documentlibrary/tddoc/td9806a.pdf>
- Rienecker, M. M., Suarez, M. J., Gelaro, R., Todling, R., et al., 2011. MERRA: NASA's Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications. *J. Climate*, 24, 3624–3648. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00015.1>
- Savoskul, O. S., and Smakhtin, V., 2013. Glacier systems and seasonal snow cover in six major Asian river basins: Hydrological role under changing climate. IWMI Research Report, 150.
- Schiemann, R., Lüthi, D., Vidale, P.L., Schär, C., 2008. The precipitation climate of Central Asia: intercomparison of observational and numerical data sources in a remote semiarid region. *International Journal of Climatology* 28, 295–314.
- Schneider, U.; Becker, A.; Finger, P.; Meyer-Christoffer, A.; Rudolf, B.; Ziese, M., 2015. GPCP Full Data Reanalysis Version 7.0 at 0.5°: Monthly Land-Surface Precipitation from Rain-Gauges built on GTS-based and Historic Data. Report of the German Weather Service. DOI: 10.5676/DWD_GPCC/FD_M_V7_050
- Sen, P. K., 1968. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association* 63: 1379–1389.
- Simpson, G. L., 2015. Restricted permutations; using the permute package. R vignette, available at <https://cran.r-project.org/web/packages/permute/vignettes/permutations.pdf>
- Sorg, A., Bolch, T., Stoffel, M., Solomina, O., and Beniston, M., 2012. Climate change impacts on glaciers and runoff in Tien Shan (Central Asia). *Nature Climate Change* 2 (10): 725–731.
- Soria-Auza RW., Kessler M., Bach K., Barajas-Barbosa, P.M.-, Lehnert, M., Herzog, S. K., Böhner, J. et al., 2010. Impact of the quality of climate models for modelling species occurrences in countries with poor climatic documentation: a case study from Bolivia. *Ecological Modelling* 221:1221–1229
- Unger-Shayesteh, K., Vorogushyn, S., Farinotti, D., Gafurov, A., Duethmann, D., Mandychev, A., and Merz, B., 2013. What do we know about past changes in the water cycle of Central Asian headwaters? A review. *Global and Planetary Change* 110, Part A: 4 – 25
- Wang A, Zeng X (2012) Evaluation of multireanalysis products with in situ observations over the Tibetan Plateau. *J Geophys Res* 117: D05102, doi: 10.1029/2011JD016553
- WMO (World Meteorological Organization), 2003. Guideline on climate metadata and homogenization. WMO/TD No. 1186
- WMO (World Meteorological Organization), 2008. Guide to Hydrological Practices. Volume I Hydrology – From Measurement to Hydrological Information. WMO-No. 168.

- WMO (World Meteorological Organization), 2011. Guide to Climatological Practices. WMO-No. 100. Available at: www.wmo.int/pages/prog/wcp/ccl/guide/documents/WMO_100_en.pdf
- Yatagai, A., K. Kamiguchi, O. Arakawa, A. Hamada, N. Yasutomi and A. Kito (2012): APHRODITE: Constructing a Long-term Daily Gridded Precipitation Dataset for Asia based on a Dense Network of Rain Gauges, Bulletin of American Meteorological Society, doi: 10.1175/BAMS-D-11-00122.1.
- Yue, S., Pilon, P., Phinney, B., and Cavadias, G., 2002. The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series. Hydrological Processes 16 (9): 1807-1829.
- Zhang, X., Vincent, L.A., Hogg, W.D. and Niitsoo, A., 2000. Temperature and Precipitation Trends in Canada during the 20th Century. Atmosphere-Ocean 38(3): 395-429.

Русская библиография

- ВМО (Всемирная Метеорологическая Организация), 2011. Руководство по гидрологической практике. Том I Гидрология: от измерений до гидрологической информации. ВМО-№ 168.
- ВМО (Всемирная Метеорологическая Организация), 2014. Руководство по климатологической практике. ВМО-№ 100. (https://www.wmo.int/pages/prog/wcp/ccl/guide/documents/wmo_100_ru.pdf)